

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月18日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03961

研究課題名（和文）パルス電力技術を用いた両極性パルスイオン加速器の開発とパルスイオン注入技術の創成

研究課題名（英文）Development of bipolar pulse accelerator by using pulsed power technology and creation of inovative pulsed ion implantation

研究代表者

伊藤 弘昭（ITO, Hiroaki）

富山大学・大学院理工学研究部（工学）・教授

研究者番号：70302445

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,900,000円

研究成果の概要（和文）：次世代半導体デバイス作製における新しいパルスイオン注入法の実現に向けた知見を得るために、窒素イオンビームに対しては高純度パルス重イオンビーム発生技術である両極性パルス加速技術の開発を行い、半導体材料へのビーム照射効果を調査した。最適条件に近づくと窒素イオン純度が向上しており、両極性パルス加速技術を実証できた。また、パルスアルミニウムレーザーイオン源の開発を行い、イオン電流密度のレーザー波長、レーザー入射角度、レーザーの偏光依存性などを調べ、ショットの再現性は安定していることがわかった。窒素イオンビームによる材料照射実験では、まだ確証不足であるがイオン注入効果と思われる興味深い結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

パルス電力技術を用いた両極性パルス加速技術の開発は、従来のパルスイオンビーム技術の欠点であるビーム純度向上を実現でき、炭化ケイ素に代表される次世代省エネ半導体デバイスを作製するために必要な集積化技術の1つである新しいパルスイオン注入法の基礎実験を行える点で重要な技術である。また、半導体材料へのパルスイオンビーム照射実験はパルスイオン注入法の技術開発につながる重要な結果であり、超低損失半導体デバイスの普及促進し、低炭素社会実現に期待できる。この技術はパルスイオンビームの材料表面改質などの材料プロセス技術への応用が可能となり、新しい機能を持った材料開発が期待できる点でも意義がある。

研究成果の概要（英文）：We developed the bipolar pulse accelerator for the pulsed nitrogen ion beam which can generate an intense pulsed ion beam with higher purity than the conventional ion diode to perform experiments on the new pulsed ion implantation. By evaluating the ion species and the energy spectrum of the ion beam via a Thomson parabola spectrometer, it was confirmed that the ion beam consists of singly and doubly ionized nitrogen ions and the proton impurities and that the ions were successfully accelerated in the two-stage acceleration gap by applying the bipolar pulse. In addition, we developed the laser ion source for the pulsed aluminum ion beam and investigated the dependence of the ion current density on laser wavelength, laser incidence angle, and laser polarization. It was found that the obtained ion beam has the the good shot-to-shot reproducibility. We investigated the ion implantation and the surface annealing by irradiating semiconductor materials with the pulsed nitrogen ion beam.

研究分野：パルスパワー工学

キーワード：パルス重イオンビーム 両極性パルス加速器 パルス電力技術 パルスイオン注入

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電子デバイス業界において、省エネルギー化、高速化への要求が高まっており、シリコン半導体は材料限界に近づきつつある状況の中、デバイスとしての性能指数が優れている炭化ケイ素、窒化ガリウム、さらにはダイヤモンドといった次世代半導体材料が注目され、低炭素社会実現に向けて大きな効果が期待されている。近年、炭化ケイ素に代表されるワイドギャップ半導体デバイスの作製に必要な技術の研究開発が行われてきた結果、炭化ケイ素を用いたダイオードや MOSFET が市場に普及し始め、電車、ハイブリッド車や電気自動車、送電システム、家電製品などのパワーデバイスとして使用されつつあり、パワーデバイスの開発がより一層精力的に行われている。

しかし、今後の次世代半導体デバイスの普及促進のためには集積化技術が必要不可欠である。デバイス作製において、伝導度を制御するため局所部分に不純物を添加する技術が必要であり、次世代半導体では熱拡散によるドーピングが困難なため、イオン注入が用いられ、結晶欠陥の回復や不純物の活性化のために 1500 以上の高温アニールが必要となる。このような超高温プロセス下では、金属-半導体界面、絶縁体-半導体界面など、電子素子の基本構造の作成が困難で素子化プロセスと両立できず、集積化におけるデバイス作製の工程順序に制限を与える。さらに表面のグラファイト化やイオン注入層厚の減少などの様々なアニール誘起損傷が生じる問題点がある。このためイオン注入後のアニール温度の低温化が炭化ケイ素デバイスの集積化・多様化に向け、大きな課題のひとつとなっている。これまでアニール温度の低温化技術としてレーザーアニール法が報告されているが、レーザー照射面積が小さい等まだ多くの課題があり、実用化レベルには至っておらず研究開発が行われている。

パルス重イオンビームは付与エネルギー密度が非常に高いため、材料はビーム照射開始とともに急速に加熱され、パルス終了後には加熱領域は材料深層への熱拡散によって急激に冷却される。この急激な温度変化によって再結晶化が起こるので、次世代半導体材料へのイオン注入プロセスの低温化に応用が可能と考え、新しいイオン注入技術として高強度パルス重イオンビームを利用したイオン注入とアニール処理が同時にできる“パルスイオン注入法”を提案した。しかし、従来のパルスイオンビーム技術では、発生できるイオン種は一部のイオン種に限られており、さらにイオンビームには不純物イオンが多く含まれ、ビーム純度は 50~70%程度であるためイオン注入には適用できない。このため次世代半導体への新しいパルスイオン注入法の確立に向け、n 型・p 型ドーパントとして機能する高純度・高強度パルス重イオンビームが必要不可欠であり、パルス電力技術を利用したパルス重イオンビーム発生技術の開発し、基礎研究を行ってきた。

これまでの研究により、n 型ドーパントとして機能する窒素イオンビームに対しては、ガスプラズマガンを用いたパルス重イオンビーム発生技術を開発し、世界に先駆けて電流密度 ~50 A/cm²、パルス幅 ~100 ns、ビーム純度 ~94 % のパルス窒素イオンビームの発生に成功し、イオンビームのさらなるビーム純度向上が可能である両極性パルス加速器技術を開発した。また、p 型ドーパントとして機能するイオン種 (アルミニウムイオン) の発生に向けて真空アークイオン源を用いたパルスイオンビーム源を開発し、イオン電流密度 ~200 A/cm² 以上、ビーム純度 ~89 % のアルミニウムイオンビームの発生に成功した。しかし、パルスイオン注入法を実現するためには、これまで開発したパルスイオンビームの特性では不十分な部分があった。

2. 研究の目的

パルスイオン注入法の実現の第一歩として、パルス重イオンビームによる p 型と n 型半導体の作製、および p-n 接合の形成を目指す必要がある。本研究の目的は、パルスイオン注入法に要求される条件を満たすパルス重イオンビーム技術のさらなる開発を行い、パルス重イオンビームの照射効果を評価するとともに、p 型と n 型半導体を作製することである。まず、これまで開発してきたパルスイオンビーム技術の高度化を目指し、パルス電力技術による高電圧両極性パルスを組み込んだ両極性パルス加速器を開発し、イオンビーム純度の向上の実証を行う。また、p 型ドーパント用アルミニウムイオンビームのショット再現性向上のためにレーザーイオン源の開発を行う。その後、シリコンおよび炭化ケイ素材料への p 型・n 型ドーパントのパルスイオン注入実験により、照射効果を評価することでパルスイオン注入法の実用化に向けた知見を得るとともにパルスイオンビームの最適化パラメーターを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、パルス重イオンビーム発生技術の向上を行い、そのイオンビームを半導体材料へ照射してその効果を調べた。

炭化ケイ素に対して n 型ドーパントとして機能するパルス窒素イオンビームにおいては、イオン純度向上に向けて両極性パルス加速器技術の実証を行った。図 1 に示すように両極性パルス加速器は接地されたイオン源(陽極)、ドリフト管(加速管)、接地された陰極から構成されており、イオン源としてガスプラズマガンを用いた磁気絶縁型加速ギャップを使用したイオンダイオードである。両極性パルス加速器の基本原理は 2 段の静電加速器である。つまり、ドリフト管に両極性パルス電圧を印加すると、まず負極性の電圧パルスが印加されるので、1st ギャップに到達したイオンビームはドリフト管に向かって加速される。その後、加速されたイオンビームがドリフト管を通過して 2nd ギャップに到達した時にパルスの極性が反転して正極性の

電圧がドリフト管に印加されるので、イオンは2ndギャップで再加速される。この多段加速を行うことにより、イオンの質量差による速度の違いを利用することで不純物イオンを除去し、ビーム純度を向上させることができる。ドリフト管の長さは両極性パルスの電圧やパルス幅とイオン種によって調整する。例えば、イオン源に N^+ と不純物イオンとして H^+ が含まれる場合を考え、両極性パルスの電圧とパルス幅をそれぞれ $V_0 = \pm 200$ kV、 $\tau_p = 70$ ns をすると、 H^+ ビームの73%が取り除かれ、 N^+ ビームの純度が向上することになる。

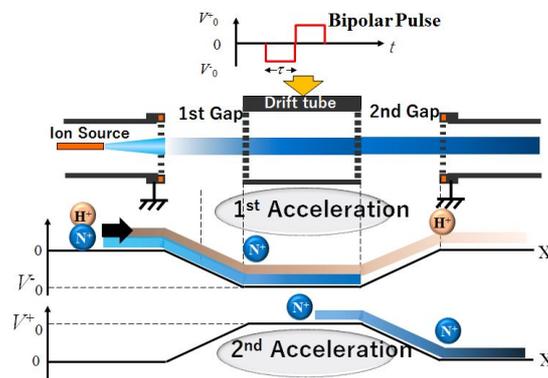


図1 両極性パルス加速の原理

両極性パルスイオン加速技術によるパルス窒素イオンビームに対しては、下記の(1)~(4)の実験を中心に取り組んだ。レーザーイオン源によるパルスアルミニウムイオンビームに対しては、ファラデーカップを用いてレーザーイオン源から得られるイオンビームの特性(電流、イオン価数、パルス幅等)とレーザーパラメーターの依存性を評価した。

- (1) バイアスイオンコレクターでパルスイオンビームの電流密度とパルス幅の計測
- (2) トムソンパラボラ分析器を用いたエネルギー、イオン種、ビーム純度の計測
- (3) カロリメータによる付与エネルギー密度の計測
- (4) パルス窒素イオンビームによる材料照射実験

実験に使用したトムソンパラボラ分析器の概略とパラメーターを図2に示す。荷電粒子は電界と磁界によってそれぞれ偏向し、その偏向量から荷電粒子の種類とエネルギーを計測する分析器である。電場による偏向量 D_E 、磁場による偏向量 D_B はそれぞれ次式となる。

$$D_E = \frac{ZeLL_1}{mv^2}, \quad D_B = \frac{ZeBL_1}{mv}$$

ここで、 m と Z はそれぞれイオンの質量と価数、 v はイオンの速度、 e は電気素量、 L は磁極の長さ、 E は偏向電場、 B は偏向磁場である。 L_1 は磁石中心から検出器までの距離である。これらの理論式と実験により得られたトラックパターンからイオンの種類と価数、エネルギーを導出することができる。検出器には固体飛跡検出器(CR-39)を用いた。

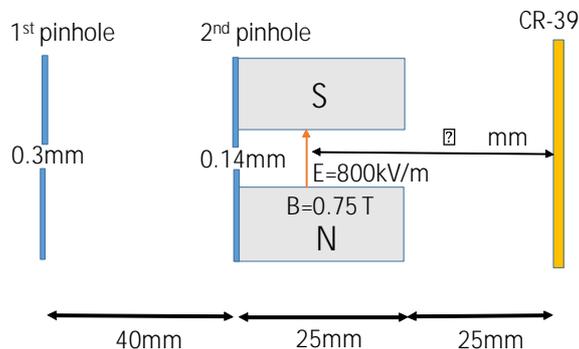


図2 トムソンパラボラ分析器の概略図

4. 研究成果

両極性パルスイオン加速の実証には、1stギャップと2ndギャップで加速されたパルス窒素イオンビームの特性を評価する必要がある。これまで1stギャップで加速されたイオンビームはバイアスイオンコレクターや磁場偏向型エネルギー分析器を用いて評価されてきた。この結果によると、イオンビームには1価と2価の窒素が含まれていることが確認され、磁場偏向量から窒素イオン N^+ と N^{2+} のエネルギーは、ほぼ両極性パルス電圧の1stパルスのピーク電圧とほぼ等しく、両極性パルス電圧のピーク値付近で窒素イオンが加速されていることが示されてきた。本研究では、イオンビームのイオン種同定とエネルギー評価の確証を高めるために、イオンビームを材料に照射した際、イオン飛程がビームエネルギーに依存することを利用する。検出器CR-39にイオンビームを照射して多段階エッチングすることでイオン飛程を測定し、2体衝突シミュレーション(SRIM)の結果を比較することでイオンビームのイオン種とエネルギーを評価する。初段加速されたパルスイオンビームをCR-39に照射後、多段階エッチングを行い、粒子の検出位置、粒子密度、イオン飛程を算出した結果、水素イオンと1価と2価の窒素イオンを確認することができ、イオンエネルギーは両極性パルス電圧の1stパルスの電圧とほぼ等しい結果が得られた。

次に、トムソンパラボラ分析器を用いて2段加速されたパルスイオンビームのイオン種の同定とエネルギーの評価を行った。実験は両極性パルス発生器の定格80%で行い、このとき各ピーク電圧が-176 kV と +175 kV、パルス幅70 nsの両極性パルス電圧が観測された。図3にイオンビームを7回照射したときに得られた検出器のトラックパターンを示す。縦軸方向は電界偏向量、横軸方向は磁界偏向量をそれぞれ表している。図3中の左下の赤で囲ったトラックは電界と磁界で偏向されない中性粒子であり、黒で囲った点は変更電界を印加せず、磁界にのみ偏向されたイオンである。中性粒子を原点として上式から算出される偏向量と比較すると、黄色で囲まれたトラックは窒素イオンであると推測でき、1価と2価の窒素イオンが観察されている。

一方、緑で囲まれたトラックは薄い、不純物である水素イオンであると考えられる。電界による偏向量からエネルギーを算出すると、価数当たり最大約 350 keV となり、印加した両極性パルス電圧のピーク値の和とほぼ一致するので、窒素イオンは2段加速されていると考えられる。両極性パルス電圧を小さくすると、イオンエネルギーが減少するとともに窒素によるトラックが薄くなることから、イオン純度が悪くなることが分かる。従って、イオンビームは両極性パルス電圧によって2段加速されており、両極性パルス加速器の動作を実証することができた。今後、分析器の分解能を改善し、より正確な分析を行う必要がある。

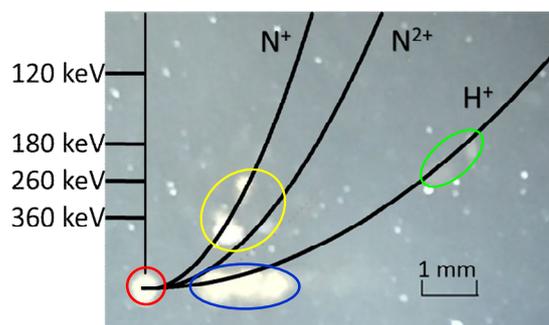


図3 CR-39 検出器で得られたトラックパターン

次に、得られたパルス窒素イオンビームを用いて半導体材料に付与するエネルギーをカロリメータを用いて計測を行った。カロリメータの構成は照射ターゲットとしてシリコンを用い、その温度上昇をアルメル-クロメルの熱電対で計測した。その温度変化(ΔT)から次式を用いてパルスイオンビームの付与エネルギー(Q)を求めた。

$$Q = MC_p \Delta T \quad [J]$$

ここで、 M と C_p はそれぞれ吸収材の質量と比熱である。この実験により、付与エネルギーを測定することができ、半導体材料に対して十分な温度効果が得られることが推測でき、パルスイオンビームによるアニール効果を検証することができた。一方、イオン注入の効果については、まだ検証不足であり、明確なデータを得るには至らなかったため、実験を継続する必要がある。

p型ドーパントのアルミニウムイオンビームに対しては、YAGレーザーを用いたレーザーイオン源の開発を行い、2倍波(532nm)と4倍波(266nm)を用い、レーザー波長に対するイオンビームの特性を評価した。さらに、イオン電流密度のレーザー強度、レーザー入射角度、レーザーの偏光依存性などを調べ、パルス重イオンビームのイオン源としての適応性についても検討を行った結果、ショットの再現性は安定していることがわかった。今後、レーザーイオン源を開発した両極性パルス加速技術に組み込むために装置の配置を含めて検討する必要がある。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計7件)

T.Honoki, H. Ito, Study on 2-Stage Acceleration of Pulsed Heavy Ion Beam using Bipolar Pulse Voltage, Research Report NIFS-PROC, 査読無, 110, 2018, pp.46-50.

H. Ito, Y. Nakata, Z.P. Wang, Deposition of DLC films using intense pulsed beam in plasma focus device, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, 査読有, 137, 2017, pp. 559-563.

K. Okajima, K. Sugiura, H. Ohashi, H. Ito, Energy evaluation of Pulsed Heavy Ion Beam produced by Bipolar Pulse Accelerator, Research Report NIFS-PROC, 査読無, 106, 2017, pp.69-73.

H. Ohashi, K. Oyama, T. Mitani, K. Naiki, T. Nakayama, H. Ito, A Versatile Laminar Flow Atmospheric Pressure Plasma Jet Using a Double Coaxial Glass Tube, IEEE Transactions on Plasma Science, 査読有, 45, 2017, pp.2481-2485.

[学会発表](計66件)

寺田匡志,石田治康,伊藤弘昭, 両極性パルス加速器におけるパルス重イオンビームの2段加速の実証, 平成31年電気学会全国大会, 2019年3月, 北海道科学大学

寺田匡志,石田治康,伊藤弘昭, 高強度パルス重イオンビーム発生を目的とした両極性パルス加速器の開発, 平成30年度核融合科学研究所共同研究研究会, 2019年1月, 核融合科学研究所

M.Terada, H.Ishida, H.Ito, Two-stage acceleration of intense pulsed heavy ion beam by bipolar pulse accelerator, 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, 2018年11月, Kanazawa, Japan

M.Terada, T.Honoki, H.Ito, Energy evaluation of pulsed heavy ion beam in bipolar pulse accelerator, 7th Euro-Asian Pulsed Power Conference & 22nd International Conference on High-Power Particle Beams, 2018年9月, Changsha, China

寺田匡志, 朴木太郎, 山本晃平, 伊藤弘昭, 両極性パルス加速器におけるパルス重イオンビームのエネルギー評価, 平成30年電気学会全国大会, 2018年3月, 九州大学

T.Honoki, M.Terada, K.Yamamoto, H.Ito, Evaluation of Pulsed Heavy Ion Beam from

Bipolar Pulse Accelerator, Plasma Conference 2017, 2017年11月, Japan
T.Honoki, H.Ito, Development of Bipolar Pulse Accelerator for High-Purity Intense heavy Ion Beam, 21th International Pulsed Power Conference, 2017年6月, Brighton, UK

朴木太郎,伊藤弘昭,両極性パルス加速器におけるパルス重イオンビームの2段加速実験, 電気学会プラズマ・パルスパワー・放電合同研究会, 2017年5月, 京都工芸繊維大
朴木太郎,今井嘉生,大橋隼人,伊藤弘昭,高強度パルス窒素イオンビーム発生用両極性パルス加速器の開発,平成29年電気学会全国大会,2017年3月,富山大学
朴木太郎,今井嘉生,大橋隼人,伊藤弘昭,高強度パルス重イオンビーム発生を目的とした両極性パルス加速器の開発,平成28年度核融合科学研究所共同研究研究会,2017年1月,核融合科学研究所

T.Honoki, K.Okajima, H.Ito, Development of Bipolar Pulse Accelerator with Gas Puff Plasma Gun for High-Purity Intense heavy Ion Beam, 6th Euro Asian Pulsed Power Conference, 2016年9月, Estoril, Portugal

T.Nakamura, S.Shinokawa, M.Teramae, F.Niwa, H.Ito, Influence of cavity structure on Microwave Pulse emitted from Axial Virtual Cathode Oscillator, 6th Euro Asian Pulsed Power Conference, 2016年9月, Estoril, Portugal

T.Honoki, K.Okajima, H.Ohashi, H.Ito, Characteristics of pulsed heavy ion beam produced by bipolar pulse accelerator with gas puff plasma gun, 18th International Congress on Plasma Physics, 2016年6月, Kaoshiung, Taiwan

T.Mitani, K.Oyama, H.Ohashi, H.Ito, Characterization of laminar gas-fed atmospheric pressure plasma jet using a coaxial double glass tube, 18th International Congress on Plasma Physics, 2016年6月, Kaoshiung, Taiwan

朴木太郎,岡島慧人,大橋隼人,伊藤弘昭,両極性パルス加速器によるパルスイオンビーム生成と特性評価」平成28年電気学会全国大会,2016年3月,東北大学

岡島慧人,朴木太郎,大橋隼人,伊藤弘昭,両極性パルス加速による高強度パルス重イオンビームの特性評価,平成27年度核融合科学研究所共同研究研究会,2016年1月,核融合科学研究所

朴木太郎,岡島慧人,大橋隼人,伊藤弘昭,両極性パルス加速器によるパルス重イオンビームの特性評価,平成27年電気学会基礎・材料・共通部門大会,2015年9月,金沢大学

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：大橋 隼人

ローマ字氏名：(OHASHI, Hayato)

所属研究機関名：富山大学

部局名：教養教育院

職名：講師

研究者番号(8桁)：60596659

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。