

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540534

研究課題名(和文)次世代省エネデバイス用半導体への高強度パルス重イオンビーム利用イオン注入法の検証

研究課題名(英文)Verification of ion implantation method using intense pulsed heavy ion beam for next generation semiconductor

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：次世代省エネルギーデバイス開発に重要なイオン注入と同時にアニール処理が可能な新しいパルスイオン注入法の実現に向けて必要なn型・p型ドーパントの機能を有する高強度パルス重イオンビーム発生技術の開発を行った。n型ドーパントのパルス窒素イオンビームに対しては高出力化、ビームの空間均一性の向上を図った。p型ドーパントとして機能する金属イオン源に対しては真空アークイオン源および細線放電イオン源の電極形状や放電条件による特性評価を行うと共にレーザーイオン源の開発も行った。また、ビームの照射効果においてはアニール効果を検証し、必要な付与エネルギー密度を評価できた。

研究成果の概要(英文)：The intense pulsed ion beam has received extensive attention as a tool for a new ion implantation technology named pulsed ion beam implantation to semiconductor materials such as silicon carbide, since the ion implantation and the annealing can be completed simultaneously. To realize the new ion implantation, it is very important to develop the intense pulsed ion beam technology of generating high-purity ion beams from various species. For the pulsed nitrogen ion beam acting as a donor, we improved the intensity and the spatial uniformity of the ion beam. For the pulsed aluminum ion beam acting as an acceptor, we developed the vacuum arc plasma gun and the exploding wire ion source and evaluated the dependence on electrical parameters and electrode structure. In addition, we developed the laser ion source for the pulsed metallic ion beam. To investigate the irradiation effect of the ion beam, the energy density was evaluated by irradiating a silicon substrate with the pulsed ion beam.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：パルス重イオンビーム 両極性パルス パルスイオン注入 レーザーイオン源 パルス電力技術

### 1. 研究開始当初の背景

電子デバイス業界においては、益々、高速化への要求が高まってきており、シリコン半導体は材料限界に近づきつつある。そのような状況の中、小型・低損失・高効率のパワーデバイスや高周波デバイスとしての性能指数が優れている炭化ケイ素 (SiC) が次世代省エネルギーパワーデバイス用半導体材料として注目されており、低炭素社会実現に向けて大きな効果が期待されている。

しかし、炭化ケイ素に代表されるワイドギャップ半導体は、シリコン半導体に比べて化学結合力が強いいため、従来のシリコン半導体技術では対応できないので、基本デバイス作製に必要な技術の研究開発が必要である。その中で、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須であり、炭化ケイ素では不純物原子の拡散速度が極めて遅く、熱拡散によるドーピングが困難であるので、通常イオン注入が用いられている。しかし、イオン注入に伴う結晶欠陥の回復、及び不純物の活性化のため高温アニール処理が行われる。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あり、素子化プロセスと両立できない。さらに表面のグラファイト化やイオン注入層厚の減少等の様々なアニール誘起損傷が生じる。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実用化・多様化に向けて大きな課題のひとつとなっている。

このように従来の技術では対応できないことから、次世代省エネデバイス用半導体材料へのイオン注入プロセスの低温化を目指した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、パルス重イオンビーム発生技術の開発とパルスイオン注入法の研究を行ってきた。パルスイオン注入法は従来のイオン注入法とは違い、半導体材料に付与されるエネルギー密度が非常に高いので、材料はビーム照射開始とともに急速に加熱・溶融し、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・凝固する。この急激な温度変化によってイオンのドーピングと同時に注入層の再結晶化が起こり、従来のようなイオン注入後の高温アニール処理を行う必要がない利点がある。その他にも (1)処理時間が極めて短く、昇温冷却速度が大きい( $10^7$ - $10^{10}$  K/秒)、(2)イオンビームのイオン種、エネルギー、イオン電流密度、パルス幅を容易に選択できるので、イオン注入深さ、注入量、付与エネルギーの制御がしやすい、(3)処理面積が大きい、等の利点がある。

新しいイオン注入技術であるパルスイオン注入法の実現には、n型・p型ドーパントとして機能するパルス重イオンビームが必要である。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ているためイオン注入用として適用することができなかった。そのためパルスイオン注入法の研究においては、目立った動きはなかった。

### 2. 研究の目的

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 $\sim 50$  A/cm<sup>2</sup>、パルス幅 $\sim 100$  ns、ビーム純度 $\sim 94$  %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 $\sim 200$  A/cm<sup>2</sup>以上、ビーム純度 $\sim 89$  %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。

本研究では、パルスイオン注入法に要求されるビーム条件 (空間均一性、再現性、イオン純度等) を満たすビーム発生技術のさらなる開発を行う。このため、窒素イオンビームに対しては、高出力化や空間均一性の改善に向けて加速ギャップや加速条件の最適化を行い、アルミニウムイオンビームに対しては、均一性、安定性の改善を図ると共に、次世代半導体材料へのパルスイオン注入法の実用化に向けた知見を得るためにパルスイオンビームの照射効果の評価を行うことを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、パルスイオン注入法の実現に必要な基盤技術であるパルスイオンビームの特性向上に向けて実験を行った。

パルス窒素イオンビームに対しては、両極性パルス加速器技術適用に向けて (1) ~ (4) に取り組んだ。一方、パルスアルミニウムイオンビームに対しては、ビームショットの安定性や再現性を中心に (5) ~ (7) について行った。

(1) 高出力化、ビームの空間均一性の向上を図るために、ビーム加速ギャップの磁場配位や加速電極形状の改善。

(2) 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。

(3) 磁場偏向型分析器を用いたエネルギー、イオン種、ビーム純度の測定。

(4) パルス窒素イオンビームによる材料照射実験とカロリメータによる付与エネルギー密度の評価。

(5) これまで固体イオン源として開発してきた真空アークイオン源、及び細線放電イオン源の電極形状、放電条件による特性評価。

(6) 特性を評価したイオン源を組み込んで、パルスイオンビームの電流密度とパルス幅の計測。

(7) レーザーイオン源の開発と特性評価。

#### 4. 研究成果

パルス窒素イオンビームでは、両極性パルス加速器を利用する。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。

加速電極構造の改良後、バイアスイオンコレクターを用いて両極性パルス加速器で得られるパルスイオンビームのビーム電流密度とパルス幅の計測を行った。その結果、ドリフト管に出力1stパルス-114 kV、パルス幅約70 ns (FWHM)と2ndパルス+85 kV、約60 ns (FWHM)の両極性パルス電圧がドリフト管に印加したとき、1段加速ではイオン電流密度 $\sim 70$  A/cm<sup>2</sup>、パルス幅 $\sim 50$  nsのパルスイオンビームを得ることができた。これは以前の結果に比べて、約2倍のイオン電流密度を得ることができた。

1st ギャップで加速されたイオンビームのエネルギーを磁場偏向型のエネルギー分析器を使用して評価した。分析器はイオンビームをコリメートするための直径0.3 mmの2つのピンホールと磁場偏向部(24×24mm<sup>2</sup>)、そして検出器からなる。磁場はビームの進行方向に対して垂直に0.8 Tを印加し、検出器として固体飛跡検出器CR-39を用いた。ガスパフ窒素イオン源を用いた磁気絶縁イオンダイオードの実験により、イオンビームには1価と2価の窒素のほか陽子が含まれていることが確認されているので、加速されたイオンが窒素の1価と2価のイオンと仮定すると、偏向量から窒素イオンN<sup>+</sup>とN<sup>2+</sup>の最大エネルギーはそれぞれ120~130 keV、220~230 keVとなり、価数あたりに換算すると約110~130 keV/Zと評価することができた。この値は両極性パルス電圧の1stパルスのピーク電圧(-114 kV)とほぼ等しい。このことから、窒素イオンは両極性パルス電圧のピーク値付近で加速されていることが分かる。

次に、得られたパルス窒素イオンビームを

用いて照射効果を検証するとともに、カロリメータを用いてパルスイオンビームの付与エネルギーの計測を行った。カロリメータの構成はとして照射ターゲットとしてカーボンを用い、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( $\Delta T$ )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。その結果、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、そのときの付与エネルギーも評価することができた。

p型ドーパントとして機能するアルミニウムイオンビームでは、真空アークイオン源、及び細線放電イオン源に対して、電極形状や印加電圧や電圧波形を変化させて特性評価を行った結果、真空アークイオン源では、放電が発生する場所がショット毎で変化するために悪くなるので、放電開始場所が安定するような電極配置にすることで改善できた。また、細線放電イオン源では、真空アークイオン源に比べると、ショットの安定性や再現性は優れていることが分かったが、ショット毎に細線を張り替える必要があるので、多ショット運転に対応できるように細線の配置を改良し、10~20ショットを連続で運転できるようになった。しかし、真空アークイオン源に比べると、ショット数はかなり少ないのでパルスイオン注入用としては実用的ではない。上記の結果を踏まえて、電極配置を修正した真空アークイオン源をパルスイオンビーム源に組み込んで、複数個のバイアスイオンコレクターを配置してパルスイオンビームのイオン電流密度のショット安定性、再現性、空間均一性の評価を行った。この測定の結果、イオン電流密度はショット毎のバラツキはある程度改善することはできたが、まだ改善する必要がある。また、空間分布については、これまでと同じ磁気絶縁加速ギャップ構造なので、空間分布は $E \times B$ の方向に強く出力される傾向なので、ギャップ構造などを見直す必要がある。ここで $E$ は加速電界、 $B$ は磁気絶縁用の磁場である。ビームの空間分布の均一性と密接な関係があるので、出力の空間均一性に関しては、今後検討していく必要がある。さらに、新しい固体イオン源としてレーザーイオン源の開発に取り組み、イオン電流密度のレーザー強度や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い、ショットの安定性に関しては優れていることが判明した。

以上の結果、パルスイオン注入法に必要な基盤技術であるパルスイオンビームの特性改善を行い、出力の高出力化、ショット安定性、再現性の向上に向けた知見を得ることができ、パルスイオンビームの照射効果や付与

エネルギーを確認することができた。今後、両極性パルス加速器の実証に向けて2段加速実験を行い、トムソンパラボラ分析器によるイオンビームのエネルギー、イオン種、イオン純度を評価する計画である。

<引用文献>

H. Ito, H. Miyake, K. Masugata, Diagnosis of high-intensity pulsed heavy ion beam generated by a novel magnetically insulated diode with gas puff plasma gun, Rev. Sci. Instrum., Vol.79, 2008, 103502

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計8件)

H. Ito, K. Kitajima, Characteristics of Pulsed Heavy Ion Beam Generated in Bipolar Pulse Accelerator, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, 査読有, 135, 2015, pp.136-141.

R. Kishimoto, H. Ito, K. Masugata, Evaluation of Pulsed Ion Beam Produced in Plasma Focus Device, Research Report NIFS-PROC, 査読無, 94, 2014, pp.97-101.

K. Kitajima, T. Kanda, K. Masugata, H. Ito, Characteristic of Intense Pulsed Heavy Ion Beam by Bipolar Pulse Accelerator, Research Report NIFS-PROC, 査読無, 93, 2014, pp.78-83.

H. Ito, Y. Ochiai, T. Murata, K. Masugata, Development of Exploding Wire Ion Source for Intense Pulsed Heavy Ion Beam Accelerator Radiation Effects and Defects in Solids, 査読有, 167, 2012, pp.719-725.

[学会発表](計25件)

大山耕平, 中山智裕, 大橋隼人, 伊藤弘昭, 二重同軸ガラス管構造を用いた大気圧プラズマジェットの実験評価, 平成27年電気学会全国大会, 2015年3月26日, 東京都市大学

岡島慧人, 杉浦慶哉, 大橋隼人, 伊藤弘昭, 両極性パルス加速を用いたパルス重イオンビームのエネルギー評価, 平成26年度核融合科学研究所共同研究研究会, 2015年1月9日, 核融合科学研究所

杉浦慶哉, 岡島慧人, 大橋隼人, 伊藤弘昭, 高純度パルスイオンビームに向けた両極性パルス加速器の開発, Plasma Conference 2014, 2014年11月21日, 新潟市朱鷺メッセ

K. Okajima, K. Kitajima, H. Ohashi, H. Ito, Development of Intense Pulsed Ion Beam Source Using Bipolar Pulses, 5th Euro Asian Pulsed Power Conference, 2014年9月10日, Kumamoto Univ.

S. Shinokawa, R. Shinoda, T. Nakamura, H. Ohashi, H. Ito, Output Characteristics of High Power Microwave generated in Virtual Cathode Oscillator using

Different Cathode Materials, 5th Euro Asian Pulsed Power Conference, 2014年9月9日, Kumamoto Univ.

K. Okajima, H. Ohashi, H. Ito, Characteristics of Intense Pulsed Heavy Ion Beam by Bipolar Pulse Accelerator, 41st IEEE International Conference on Plasma Science and the 20th International Conference on High-Power Particle Beams, 2014年5月27日, Washington DC, USA

H. Ito, R. Kishimoto, H. Ohashi, Angular Distribution Measurements of Energy Spectra of Plasma Focus, 41st IEEE International Conference on Plasma Science and the 20th International Conference on High-Power Particle Beams, 2014年5月26日, Washington DC, USA

岡島慧人, 北島一樹, 勘田崇史, 伊藤弘昭, 両極性パルス加速を用いた高強度パルス重イオンビームの特性, 平成25年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 2013年9月12日, 横浜国大

入江仁, 岸本竜太, 伊藤弘昭, プラズマフォーカスにおける高エネルギーイオンビームの空間分布特性, 平成25年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 2013年9月12日, 横浜国大

北島一樹, 勘田崇史, 伊藤弘昭, 両極性パルス加速を用いたパルス重イオンビームの特性評価, 電気学会プラズマ・パルスパワー・放電合同研究会研究会, 2013年5月16日, まちなかキャンパス長岡

篠川尚吾, 東勇佑, 下根大侑, 升方勝己, 伊藤弘昭, バーカトル電極構造によるマイクロ波出力の特性, 平成25年電気学会全国大会, 2013年3月22日, 名古屋大学

北島一樹, 勘田崇史, 升方勝己, 伊藤弘昭, 両極性パルス加速を用いた高強度パルスイオンビームの特性評価, 平成25年電気学会全国大会, 2013年3月22日, 名古屋大学

[その他]

ホームページ等

<http://denryoku.eng.u-toyama.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者