

平成22年5月27日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20740319
 研究課題名 (和文) 高強度パルス重イオンビームの高純度化と次世代半導体用イオン注入技術への応用
 研究課題名 (英文) Development of intense pulsed heavy ion beam and its application to ion implantation technology for next generation semiconductor
 研究代表者
 伊藤 弘昭 (ITO HIROAKI)
 富山大学・理工学研究部・助教
 研究者番号：70302445

研究成果の概要 (和文)：

次世代半導体材料として期待されている炭化ケイ素への新しいイオン注入技術であるパルスイオン注入法を実現するためには、高純度の高電流パルス重イオンビームが必要である。本研究では、主に新しい高純度・高電流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器の開発を行った。両極性パルス電圧 $[-100\text{kV}, 70\text{ns}] + [+100\text{kV}, 70\text{ns}]$ をドリフト管(加速管)に印加したとき、1段加速ではイオン電流密度 $\sim 40\text{ A/cm}^2$ 、パルス幅 $\sim 30\text{ ns}$ 、2段加速ではイオン電流密度 $\sim 10\text{ A/cm}^2$ 、パルス幅 $\sim 30\text{ ns}$ というパルスイオンビームを得ることができた。また、飛程時間差法からイオン種、エネルギーを評価した結果、特定のイオン種(窒素イオン)のみが加速されていることがわかった。この結果から、パルス重イオンビームの多段静電加速を実証することができた。

研究成果の概要 (英文)：

In order to improve the purity of the intense pulsed ion beam a new type of a pulsed ion beam accelerator named "bipolar pulse accelerator (BPA)" has been proposed and developed. The BPA system utilizes a magnetically insulated acceleration gap and is operated with the bipolar pulse. When the bipolar pulse with voltage of about $\pm 100\text{ kV}$ and pulse duration of about 70 ns was applied to the drift tube, the ions were successfully accelerated from the grounded anode to the drift tube in the 1st gap by the negative pulse of the bipolar pulse and the pulsed ion beam with current density of 40 A/cm^2 and pulse duration of 30 ns was obtained at 50 mm downstream from the anode surface. In addition, part of the ion beam was again accelerated toward the grounded cathode in the 2nd gap by the positive pulse of the bipolar pulse. The pulsed ion beam with the peak ion current density of 10 A/cm^2 and the beam pulse duration of 30 ns was obtained at 30 mm downstream from the cathode surface.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：パルス重イオンビーム、両極性パルス加速器、パルスパワー技術、パルスイオン注入

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いるのが現状である。シリコン半導体は材料限界に近づきつつあり、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)が次世代半導体材料として注目を集めている。

炭化ケイ素半導体デバイスの素子化プロセスにおいて、局所部分に不純物を添加して伝導度を制御する技術が必要であり、炭化ケイ素では不純物原子の熱拡散速度が極めて遅いため、熱拡散によるドーピングが困難なため、イオン注入法が用いられる。しかし、イオン注入に伴う結晶欠陥の回復や不純原子の活性化のために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。そのためイオン注入後のアニールをプロセスの早い時期に行わなければならない、デバイス作製工程の順序に制限を与えている。さらに、炭化ケイ素表面のグラファイト化やイオン注入層厚の減少など、様々なアニール誘起損傷を生ずる。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。このように従来技術では対応できないことから、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、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、基礎的研究を行ってきた。

炭化ケイ素に代表される次世代半導体への新しいパルスイオン注入技術を確立するためには、高純度・大電流パルス重イオンビーム発生技術開発が不可欠である。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制限されており、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は使用できない。

2. 研究の目的

これまでの研究により、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 $\sim 50 \text{ A/cm}^2$ 、パルス幅 $\sim 100 \text{ ns}$ 、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、パルスイオンビームのアニール効果を実証した。しかし、パルスイオン注入を行うためには、さらなるビーム純度の向上が必要となる。ビーム純度を向上させる方策として、パルス電力技術を利用した新しい加速方式である両極性パルス加速器を提案し、その両極性パルス加速器技術を実用化するために短パルス・高電圧の両極性パルス電源を開発してきた。

本研究の目的は、これまで研究開発してきたパルス重イオンビーム発生技術と新しく開発した両極性パルス電源を用いた両極性パルス加速器技術を融合させることによって、新しいパルス重イオンビーム装置を開発することで高強度パルス重イオンビームの高純度化を達成し、パルスイオン注入法の実用化に向けた基礎的な研究を行うことである。

3. 研究の方法

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。

本研究では、次世代半導体材料である炭化ケイ素に対してn型ドーパントとして機能する窒素イオンビームの発生技術の確立を中心に研究を行った。

(1) 現有するパルス重イオンビーム発生装置を改良し、原理実証用両極性パルス加速器システムの開発。

(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) 飛行時間差法を用いたパルスイオンビ

ームの評価。

(4) トムソンパラボラ分析器を用いたエネルギー、イオン種、ビーム純度の測定。

(5) ガス分析装置を使用して加速電極等の付着ガスによるビーム純度への影響を評価。

(6) パルス窒素イオンビームによる材料照射実験。

4. 研究成果

最初に、現有するガスプラズマガンを用いたイオン源としたパルス窒素イオンビーム発生装置に両極性パルス電源を組み込むとともにイオンビーム加速用電極の製作、さらに両極性パルス電源と他の装置との同期を取るためのトリガー回路の製作を行い、両極性パルス加速器システムの開発を行った。

装置完成後、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結果、ドリフト管に出力[-100kV, 70ns]+[+100kV, 70ns]の両極性パルス電圧を印加したとき、1段加速ではイオン電流密度 ~ 40 A/cm²、パルス幅 ~ 30 ns、2段加速ではイオン電流密度 ~ 10 A/cm²、パルス幅 ~ 30 ns というパルスイオンビームを得ることができた。また、飛程時間差法からイオン種、エネルギーを評価した結果、特定のイオン種(窒素イオン)のみが加速されていることがわかった。この結果により、パルス重イオンビームの多段静電加速を世界に先駆けて実証することができた。

イオンビームの高出力化に向けて両極性パルス電源や加速電極構造の改良後、トムソンパラボラ分析器を用いてビーム純度を測定した結果、ビーム純度は約95%で目標値に達しなかった。この原因として残留ガスや電極等の付着ガスがビーム純度に及ぼす影響が考えられ、ガス分析装置を使用して残留ガスや電極等の付着ガスによるビーム純度への影響を評価した。その結果、加速電極等に吸着した不純物によるビーム純度への影響が大きく、さらに開発したイオンビーム発生装置は真空ポンプの性能により真空度が 10^{-3} Pa程度の真空までしか排気することができないため、残留ガスの影響が大きいことがわかった。パルスイオン注入用のイオンビーム源として実用化するためには、電極に吸着した不純物を取り除くための工夫を行ったり、さらにイオン注入の際には高真空中で行う必要があるため、真空ポンプの性能を向上させたり、電極材料を選んだりして真空度の改善を行う必要があることがわかった。

次に、パルスイオンビームの照射効果を検証するためにガラス基板上に生成されたアモルファスシリコン薄膜にイオンビームを照射した結果、アモルファス薄膜が多結晶化しており、パルスイオンビームによる照射効

果があることが確認できた。今後、パルスイオン注入の実証実験を行うためには、ビーム純度やイオン電流の空間分布等の更なるビーム品質評価を行い、電極構造等の改良を行う必要がある。

今回開発したパルスイオンビーム源はn型のドーパントとして機能する窒素イオンビームなので、パルスイオン注入の実現に向けて、p型のドーパントとして機能するパルスイオンビーム発生技術が必要となるので、p型のドーパントとして機能するアルミニウムイオンビームを発生させるための真空アーク放電を利用した同軸プラズマガンのイオン源の開発も行った。

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11件)

① H. Ito, I. Kitamura, K. Masugata, Development of Bipolar Pulse Accelerator for Intense Pulsed Heavy Ion Beam, Plasma and Fusion Research Series **8**, 2009, pp.1522-1525.

② H. Ito, K. Fujikawa, H. Miyake, K. Masugata, Characteristic observation of intense pulsed aluminum ion beam in magnetically insulated ion diode with vacuum arc ion source, IEEE Transactions on Plasma Science, 査読有, **37**, 2009, pp.1879-1884.

③ K. Fujikawa, H. Miyake, H. Ito, K. Masugata, Development of High Current Pulsed Aluminum Ion Beam with Ion Source of Vacuum Arc Plasma Gun, Research Report NIFS-PROC, 査読無, **79**, 2009, pp.51-57.

④ 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, Review of Scientific Instruments, 査読有, **79**, 2008, pp.103502-1 - 103502-5.

⑤ Z. P. Wang, H. R. Yousefi, Y. Nishino, H. Ito, K. Masugata, Preparation of silicon carbide film by a plasma focus device, Physics Letters A, 査読有, **372**, 2008, pp.7179-7182.

⑥ H. Ito, I. Kitamura, K. Masugata, Evaluation of Bipolar Pulse Generator for High-purity Pulsed Ion Beam, Research Report NIFS-PROC, 査読無, **72**, 2008, pp.51-57.

[学会発表] (計15件)

① 落合靖、藤川幸大、伊藤弘昭、升方勝己、高強度パルスイオンビーム源としての真空アークプラズマガンの特性評価、電気学会、

2010年3月17日, 明治大学

② 伊藤弘昭、高部淳二、升方勝己, 高強度パルス重イオンビーム用両極性パルス加速器の開発, 核融合科学研究所共同研究研究会, 2009年11月21日, 核融合科学研究所

③ 藤川幸大、落合靖、三宅秀典、伊藤弘昭、升方勝己, パルスパワー技術を用いたパルスアルミニウムイオンビーム発生と特性評価, 応用物理学会, 2009年9月11日, 富山大学

④ 升方勝己、伊藤弘昭, パルスパワーによる高強度パルスイオンビーム生成とその応用, プラズマ科学シンポジウム2009, 2009年2月2日, 名古屋大学

⑤ 伊藤弘昭、藤川幸大、落合靖、鍋谷実、升方勝己, 高強度パルス重イオンビームの開発と材料プロセスへの応用, 2008年12月2日, 栃木県総合文化センター

⑥ H. Ito, I. Kitamura, K. Masugata, Development of Bipolar Pulse Accelerator for Intense Pulsed Heavy Ion Beam, The 14th International Congress on Plasma Physics 2008, 2008年9月11日, 福岡国際会議場

⑦ K. Fujikawa, H. Ito, K. Masugata, Diagnosis of Intense Pulsed Aluminum Ion Beam by Magnetically Insulated Ion Diode, The 14th International Congress on Plasma Physics 2008, 2008年9月11日, 福岡国際会議場

[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・理工学研究部・助教

研究者番号: 70302445

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者