

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月22日現在

機関番号：13201

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740360

研究課題名（和文） 次世代省エネルギー半導体用高強度パルス金属イオンビーム発生とイオン注入への応用

研究課題名（英文） Generation of intense pulsed metallic ion beam for next generation semiconductor and its application to ion implantation

研究代表者

伊藤 弘昭 (ITO HIROAKI)

富山大学・理工学研究部（工学）・准教授

研究者番号：70302445

研究成果の概要（和文）：次世代省エネルギー用半導体材料への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向け、本研究では真空アーク放電を利用した同軸プラズマガンイオン源を用いた p 型ドーパント用のパルスアルミニウムイオンビーム発生技術の開発を行い、アルミニウムの比率が 89% という従来技術よりも高純度のパルスアルミニウムイオンビームを得ることができた。さらに、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を確認できた。

研究成果の概要（英文）：To realize a new ion implantation technology named “pulsed ion beam implantation” to next-generation semiconductor, it is very important to develop the IPIB technology of generating high-purity ion beams from various species. We have developed a magnetically insulated ion diode for the generation of intense pulsed metallic ion beams in which the vacuum arc plasma gun is used as the ion source. When the ion diode was operated at a diode voltage of 200 kV and a diode current of 10 kA, the ion beam with ion current density of $>200 \text{ A/cm}^2$ and pulse duration of 40 ns was obtained at 50 mm downstream from the anode. From Thomson parabola spectrometer measurement we found that Al^+ , Al^{2+} and Al^{3+} beams of 140–740 keV energy were accelerated with proton impurities of 160–190 keV energy. The purity was estimated to be 89%, which is much higher than that of the pulsed ion beam produced in the conventional ion diode. To evaluate the irradiation effect of the ion beam, an amorphous silicon thin film was used as the target, which was deposited on the glass substrate. The film was found to be poly-crystallized after the pulsed aluminum ion beam irradiation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
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、金属イオンビーム、真空アークプラズマガン、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、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パルスイオン注入法を提案し、基礎的研究を行ってきた。

しかし、イオン注入ではn型・p型ドーパントとして機能するイオンビームの発生が必要であり、従来のパルスイオンビーム技術では発生イオン種の制限のために各ドーパント用のイオン種を発生させることができず、イオン注入用として対応できなかった。

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、ガスパフプラズマガンを用いたパルスイオンビーム発生技術や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、窒素イオンビームの発生に成功した。これらの技術により、気体をイオン源とするイオンビームを発生させることはできる。しかし、半導体のドーパントの多くは固体であり、ガスパフプラズマガンでは対応することができないので、固体をイオン源とする新しい高強度パルスイオンビーム発生技術が不可欠である。

本研究では、高真空中で動作し、放電ガスが不要、高密度プラズマの生成、また、電極材料の選択により任意の金属イオンの発生が可能という利点を有する真空アーク放電を利用した同軸型プラズマガンを開発し、このイオン源を用いたパルス金属イオン(本課題ではアルミニウムイオン)ビーム発生技術を確立することを中心に行い、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イオンビームの特性評価や材料へのイオンビームの照射効果の検証を行った。

3. 研究の方法

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の発生技術の確立を中心に研究を行った。

- (1) 真空アーク放電を利用した同軸プラズマガンイオン源を組み込むためにパルス重イオンビーム発生装置の改良。
- (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) パルスイオンビーム出力の空間均一性を評価。
- (6) パルスアルミニウムイオンビームによる材料照射実験。

4. 研究成果

パルスイオンビーム発生装置は真空イオンダイオード、及び加速パルス電圧発生用マルクス発生器から構成されている。マルクス発生器の出力定格は開放端電圧 240kV、合成容量 8.33nF、蓄積エネルギー240J である。イオンダイオードは正の高電圧パルスが印加される陽極と接地電位に保持されている陰極から構成されている。陽極内部にはイオン源が設置されており、陰極は加速ギャップに電子絶縁用の磁場を発生する磁気絶縁コイルとして動作する。磁場コイルには 250 μ F、5kV のコンデンサバンクが接続されており、立ち上がり時間が 50 μ s のパルス電流によって加速ギャップの中央部に 0.8T の均一な横磁場が発生する。実験は陽極-陰極間ギャップ長 $d_{AK}=10$ mm で行った。ダイオード出力電圧の測定には容量分圧器を用い、出力電流の測定にはロゴスキーコイルを用いた。

磁気絶縁ダイオードは先端が直径 60mm、長さ 115mm の円筒状の陽極、および格子構造の陰極から構成されている。陽極内部にはパルスイオンビーム源用のイオン源としてアルミニウム真空アークイオン源が設置されており、加速ギャップに向けて高密度プラズマ

が供給される。真空アークイオン源は円筒状の外電極と棒状の内電極からなる同軸構造となっており、内電極を陰極、外電極を陽極としている。陽極は内径 10mm、外径 15mm、陰極は外径 6mm で、何れも純アルミニウム製である。陽極の先端には直径 5mm のアパーチャーが設けてあり、テーバー状の陰極と陽極アパーチャーとの間は真空アーク放電のためのギャップが形成されており、ギャップ長は 1mm とした。この真空アークイオン源の先端は、ダイオードの陽極から 50mm 上流の軸上に設置され、3.3 μ F、30kV のコンデンサバンクで駆動した。

イオン源の動作試験はバイアスイオンコレクタ (BIC) を用いて行った。BIC はイオンダイオードの陽極に対応する位置 (プラズマガンの電極先端から 50mm 下流) に設置した。放電電流は立ち上がり時間 6.5 μ s、ピーク電流 12kA となり、イオン電流密度は放電電流の立ち上がりから 5 μ s 後に立ち上がり、 $t=7.5\mu$ s で $J_i=158\text{A}/\text{cm}^2$ が得られた。放電電流の立ち上がり時にプラズマが生成されたと仮定すると、プラズマのドリフト速度は $6.7\times 10^3\text{m}/\text{sec}$ となり、1 価のアルミニウムイオンを仮定すると、その運動エネルギーは 6eV 程度と推定できる。

図 1 はイオンビーム加速実験におけるダイオード電圧 (V_d)、ダイオード電流 (I_d)、ビームのイオン電流密度 (J_i) の典型的な波形を示す。実験はマルクス発生器の充電電圧を 50kV とし、イオン源の放電電流の立ち上がりからの遅延時間 $\tau_d\sim 8\mu$ s で加速ギャップに高電圧パルスを印加した。イオン電流密度はアノードの表面から軸上 50mm 下流に設置された BIC で測定した。図より、ダイオード電圧と電流はほぼ同時に立ち上がり、それぞれ 220kV、12kA のピーク値となっていることがわかる。このときイオン電流密度 J_i は、ダ

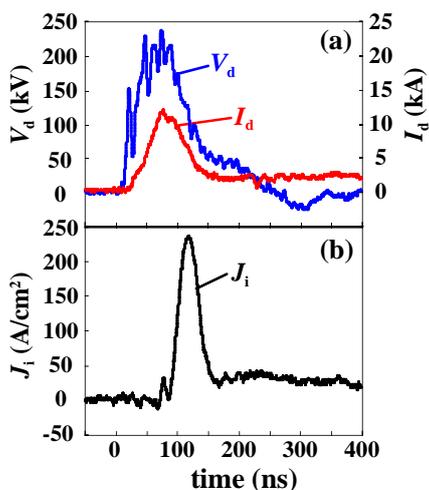


図 1 ダイオード電圧 (V_d)、ダイオード電流 (I_d)、イオン電流密度 (J_i) の典型的な波形

イオード電圧の立ち上がりから約 45ns 後に立ち上がり、ピークイオン電流密度 $230\text{A}/\text{cm}^2$ 、パルス幅 (FWHM) 40ns のパルスイオンビームが得られていることがわかる。

Time of flight 法によるイオンエネルギーの評価のため、2 個の BIC を陽極からそれぞれ 50mm 及び 150mm に設置し、両位置でのイオン電流密度の同時観測を行った。両位置でのイオン電流密度波形のピーク位置間に 96ns の時間差があり、この値よりイオンビームの速度は $1.07\times 10^6\text{m}/\text{sec}$ と算出することができる。このとき 1 価のアルミニウムイオンを仮定すると、イオンの運動エネルギーは 161keV と推定できる。このエネルギーはダイオード電圧のピーク値に比べやや低い値となっている。また、このイオン速度を仮定した場合、加速ギャップにおけるイオン電流のピークは電圧の立ち上がりからの遅れ時間 $t=75\text{ns}$ となり、電圧波形のピーク付近でイオンが加速されていると推定される。

イオンビームのエネルギーとイオン種を評価するため、アノード先端から 50mm 下流にトムソンパラボラ分析器 (TPS) を配置して実験を行った。TPS はコリメート用の 2 個のピンホール、偏向磁場、偏向電場、検出器 (CR-39) から構成されており、イオンが同方向に印加された磁界と電界中を通過することで偏向され、検出器上にトラックパターンが出現する。このパターンの形状はイオンビームに含まれるイオンの電荷・質量比に依存するためビームのエネルギーやイオン種を特定することができる。図 2 はイオントラック検出プラスチック CR-39 に記録されたトラックパターンの例を示す。分析器の質量分解能が不十分のため、重イオンについては正確な電荷・質量比を評価することはできないが、アルミニウムイオンを仮定すると 1 価、2 価、3 価に対応する位置と水素イオンに対応する位置にトラックが観測されていることが分かる。この結果より、 Al^+ 、 Al^{2+} 、 Al^{3+} 、及び H^+ のエネルギーはそれぞれ 140–270keV、220–540keV、300–740keV、170–190keV である。また、トラック数の計数により各イオン種の構成比の評価を行った。その結果、全トラックに対するアルミニウムイオンの合計 (Al^+ 、 Al^{2+} 、 Al^{3+}) の割合は 89% と評価され、89% のイオン純度が得られていることが分かった。

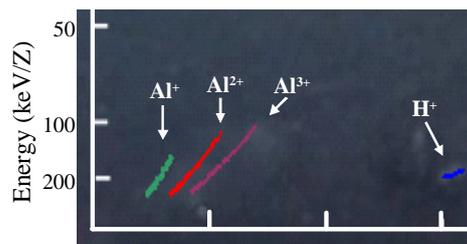


図 2 観測されたトラックパターン

次に、パルスイオンビーム出力の空間分布を評価するために5個のBICを配置してイオン電流密度の測定を行った。また、イオン電流密度の空間分布を確認するために感熱紙を用いてイオンビームによるダメージパターンの測定を行った。ここでBICと感熱紙は陽極から50 mm下流に配置した。この測定の結果、イオン電流密度は $E \times B$ の方向が強く出力される空間分布を持っていることがわかった。ここで E は加速電界、 B は磁気絶縁用の磁場である。これは、磁気絶縁加速ギャップにおいて、電子は $E \times B$ ドリフト運動を行い、電子シースを形成する。この電子シースによって実質的に加速ギャップが狭くなるので、加速電界が強くなり、Child-Langmuirの空間電荷制限電流よりもはるかに大きいイオン電流を得ることができる。そのためイオンビームの空間分布の均一性は電子シースの均一性と密接な関係がある。今回開発したパルスイオンビーム発生装置は電子ドリフトの方向に対して有限長であるため端の影響により電子シースに不均一が生じ、電子が集まる電極の端で局所的にイオン電流が大きくなると考えられる。

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に堆積させた膜厚 $1\mu\text{m}$ のアモルファスシリコンへのパルスアルミニウムイオンビームの照射実験を行った。シリコンとガラスの融点がそれぞれ 700°C 、 500°C であるので、パルスイオンビーム照射の特徴の1つである超高速熱処理を利用することで、基板に影響を与えることなく、表面層のみを瞬間的に高温に加熱することができるので、照射前後のアモルファスシリコンの結晶性をX線回折装置(XRD)で評価することで、パルスイオンビームの超高速熱処理効果を検証することができる。

ターゲットをアノード先端から50 mm下流に設置し、パルスアルミニウムイオンビームを5ショット照射した。ビーム照射前のターゲットにはX線回折の回折ピークはなく、アモルファスシリコンであることが確認できた。一方、パルスイオンビーム照射後のターゲットには新たな回折ピークが現れ、それぞれのピークが結晶面Si(111)、Si(220)、Si(311)に対応していることが確認できた。この結果から、ビーム照射によってアモルファスシリコンが多結晶化したと考えられ、パルスアルミニウムイオンビームによる超高速熱処理効果が確認できた。

これらの結果より、超高速熱処理やイオン注入に必要な条件を満たす大電流・短パルスのアルミニウムイオンビームを得ることができた。本研究で開発したアルミニウムイオンビーム発生技術は他の固体イオン源にも拡張でき、加えてこれまでに開発した気体用のガスパフプラズマガンを用いたパルスイオン

ビーム技術と組み合わせることで、多くのイオン種を発生させることができるので、パルスイオン注入技術の応用範囲が飛躍的に拡大すると期待される。また、パルスイオンビームは超高速熱処理による材料表面処理やビーム照射で生成されるプラズマによる超高速成膜などの極限プロセスを通じて半導体を含む先端材料開発への応用の可能性を有する。これらの一部はプロトンビームで既に試みられているが、重イオンの利用でその応用の幅はさらに増大すると期待される。

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13件)

① 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, (in press).

② H. Ito, Y. Ochiai, K. Masugata, Development of High-current Pulsed Heavy-ion-beam Technology for Applications to Materials Processing, Journal of the Korean Physical Society, 査読有, **59**, 2011, pp. 3652-3656.

③ H. Ito, J. Takabe, K. Masugata, Development of Bipolar Pulse Accelerator for High-Purity Intense Pulsed Ion Beam, Research Report NIFS-PROC, 査読無, **87**, 2011, pp. 98-103.

④ K. Masugata, H. Ito, Intense pulsed heavy ion beam technology, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, 査読有, **130**, 2010, pp. 879-884.

⑤ Y. Ochiai, K. Fujikawa, H. Ito, K. Masugata, Generation of Intense Pulsed Ion Beam and Its Application to Materials Processing, Research Report NIFS-PROC, 査読無, **82**, 2010, pp. 48-54.

[学会発表] (計18件)

① 下根大侑、伊藤翼、伊藤弘昭、升方勝己、メッシュ陽極を用いた相対論電子ビームの特性評価、核融合科学研究所共同研究研究会、2012年3月27日、核融合科学研究所

② 岸本竜太、伊藤弘昭、升方勝己、プラズマフォーカス装置における高エネルギーイオンビームの角度分布評価、核融合科学研究所共同研究研究会、2012年3月28日、核融合科学研究所

③ 北島一樹、松上祐介、伊藤弘昭、升方勝己、両極性パルス加速器におけるビーム特性評価、Plasma Conference 2011, 2011年11月22日、石川県立音楽堂

④ 下根大侑、伊藤翼、伊藤弘昭、升方勝己、メッシュ陽極を用いた相対論的電子ビームダイオードの特性, Plasma Conference 2011, 2011年11月22日, 石川県立音楽堂

⑤ 落合靖、藤川幸大、伊藤弘昭、升方勝己、パルス重イオンビーム用イオン源としてのAlワイヤー放電の特性評価, 核融合科学研究所共同研究研究会, 2010年12月22日, 核融合科学研究所

⑥ 刘洪明、程東旭、伊藤弘昭、升方勝己、プラズマフォーカスにおける高強度窒素パルスイオンビームの特性評価、及び表面改質への応用, 核融合科学研究所共同研究研究会, 2010年12月22日, 核融合科学研究所

⑦ H. Ito, Y. Ochiai, K. Masugata, Generation of High Current Pulsed Heavy Ion Beam for Application of Materials Processing, 3rd Euro-Asian Pulsed Power Conference & 18th International Conference on High-Power Particle Beams, 2010年10月13日, Jeju, Korea

⑧ H. Ito, Y. Nishino, K. Masugata, Emission Characteristic of High Energy Pulsed Ion Beam produced in Dense Plasma Focus Device, 3rd Euro-Asian Pulsed Power Conference & 18th International Conference on High-Power Particle Beams, 2010年10月13日, Jeju, Korea

[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・准教授

研究者番号：70302445

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者