

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：13201
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2019～2022
課題番号：19H02126
研究課題名（和文）高強度パルス重イオンビーム技術の高度化と次世代半導体用導電性制御技術の開発

研究課題名（英文）Advancement of intense pulsed heavy ion technology and its application to conductivity control technology for next-generation semiconductors

研究代表者
伊藤 弘昭（ITO, Hiroaki）
富山大学・学術研究部工学系・教授

研究者番号：70302445
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,850,000円

研究成果の概要（和文）：次世代パワー半導体の集積化技術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、p型とn型両ドーパント用の高純度パルス重イオンビーム源が必要となる。n型ドーパント用である窒素イオンビームに対しては、これまでのパルス重イオンビーム発生技術とパルス高電圧技術を組合わせた両極性パルス加速器の出力安定性やショット安定性の性能向上に取り組んだ後、半導体材料へのビーム照射実験を行い、アニール効果やイオン注入効果を検証した。一方、p型ドーパント用のイオンビーム源としては、真空アーク型イオン源を組込んだ両極性パルス加速器を開発し、高純度のパルスアルミニウムイオンビームの発生に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
パルス高電圧技術を用いた両極性パルス加速技術の開発及び高性能化は、従来のパルスイオンビーム技術の欠点である多種イオンの発生とビーム純度向上を実現できた。また、次世代パワー半導体デバイスの集積化技術に必要な新しいパルスイオン注入法の実現には必要不可欠な技術であり、p型とn型ドーパント用のパルスイオンビーム源が揃ったので、パルスイオン注入法の実現に向けてさらなる実験を行うことができる点でも意義がある。このビーム発生技術はパルスイオンビームの特徴である超高速熱処理とイオン注入の効果を持った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）：In order to obtain knowledge to realize a new pulsed ion implantation method for next-generation power semiconductor integration technology, a high-purity pulsed heavy ion beam source for both p-type and n-type dopants is required. For the nitrogen ion beam for n-type dopant, we worked on improving the performance of a bipolar pulse accelerator, which combines the conventional pulsed heavy ion beam generation technology and pulsed high voltage technology, and then conducted beam irradiation experiments on semiconductor materials to verify the annealing effect and ion implantation effect. On the other hand, for an aluminum ion beam source for p-type dopant, we developed a bipolar pulse accelerator with a vacuum arc ion source and succeeded in generating a high-purity pulsed aluminum ion beam.

研究分野：高電圧工学、プラズマ理工学

キーワード：高強度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 (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。そのような状況の中、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が注目されている。しかし、これらの半導体材料は従来のシリコン半導体技術では対応できないので、デバイス作製に必要な技術の研究開発が精力的に行われている。その結果、炭化ケイ素を用いたデバイス素子の一部が市場に普及し始め、パワーデバイスの開発が精力的に行われている。

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、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る。しかし、ドーパントの活性化のため高温アニールが必要なため様々なアニール誘起損傷が生じる。

高温アニールに起因するイオン注入法の問題点を解決するため、材料への付与エネルギー密度が非常に高いパルス重イオンビームの特徴を活かした高温・高速熱処理を利用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”を提案してきた。しかし、従来のパルス重イオンビーム技術では、発生可能なイオン種に限られており、ドーパント用のイオン種が発生できない。さらに、イオン純度が50~70%程度であるためイオン注入には適用できなかった。このため次世代半導体への新しいイオン注入法の確立に向け、高純度・高強度パルス重イオンビーム発生技術の開発が必要不可欠であった。これまでの研究により、p型とn型ドーパントとしてそれぞれ機能するアルミニウムや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てきた。それらのパルスイオンビームを用いて半導体材料への照射実験によりアニール効果を検証することはできたが、開発したパルスイオンビームではまだ不十分な特性があり、イオン注入の効果についてはまだ検証できなかった。

2. 研究の目的

パルスイオン注入法の実現に向けて、炭化ケイ素材料にパルスイオン注入法によるp-n接合の形成実験を実施し、次世代半導体の新しい導電性制御技術の実現に向けた知見を得ることであり、p-n接合試料の電気的特性やドーパント分布などの評価を通してパルスイオン注入法を実証するとともにパルスイオンビームの最適化パラメータを明らかにする。この目的を達成するため、これまで培ってきた基盤技術であるパルス重イオンビーム発生技術の性能向上、特にp型ドーパント用アルミニウムビーム技術にイオン純度向上が可能な両極性パルス加速技術を組み込んだ新しいビーム源を再構築し、イオン純度やビーム均一性などの特性向上を目指す。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、これまでのパルス重イオンビーム発生技術とパルス高電圧技術を組合わせた両極性パルス加速器によって生成されるパルス重イオンビームの出力安定性やショット安定性などの性能向上を行った。また、そのパルス重イオンビームを用いて半導体材料への照射実験を行い、その照射効果を検証した。

次世代半導体の1つ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パルス窒素イオンビームにおいては、両極性パルス加速器による純度向上確認と性能向上に取り組んだ。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解は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

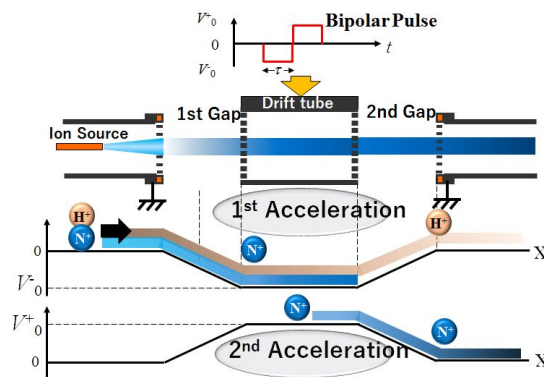


図1 両極性パルス加速の原理

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。一方、p型ドーパントとして機能するイオンビーム源としては、真空アーク型イオン源を組み込んだ両極性パルス加速器を設計・製作した。両極性パルス加速器で生成されたパルス重イオンビームに対しては、下記の(1)~(3)の実験を行い、パルスイオンビームの特性評価と材料へのビーム照射効果を調べた。

- (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) 磁場偏向型質量分析器、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) パルス重イオンビームによる半導体材料への照射実験

トムソンパラボラ分析器は、荷電粒子が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イオン種とエネルギーを計測する分析器であり、実験で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。

4. 研究成果

最初に、パルス窒素イオンビームに対する結果について述べる。初段加速、二段加速されたパルスイオンビームの電流密度をバイアスイオンコレクターで測定した。初段加速では約 60 A/cm²の電流密度を測定できたが、二段加速後の電流密度は約 600 mA/cm²となってしまう、初段加速部と比較すると、約 $1/100$ 程度に低下しており、両極性パルス加速器の実用化に向けた課題である。しかし、この課題は加速部であるドリフト管の長さをイオンビーム加速の整合条件と一致するように変更することで、電流密度を改善することができる。

次に、トムソンパラボラ分析器を用いたエネルギー評価の結果を図2に示す。図2の実線は理論値曲線であり、実験で得られたイオントラックを重ねると、イオン種は窒素の1価と2価イオン、水素イオンが検出され、エネルギー評価の結果では初段加速では $140 \sim 160$ keV、二段加速では約 $90 \sim 340$ keV が得られ、窒素イオンが二段加速されていることがわかった。また、窒素イオン、水素イオンのトラック数(粒子痕)を数えることで、窒素イオンビームの純度を評価することができる。その結果、窒素イオンビームのイオン純度は、初段加速では 91.1% 、二段加速では 98.8% のイオン純度が得られ、二段加速によるイオン純度の向上が確認でき、両極性パルス加速器の二段加速によるイオン純度の向上の検証を行うことができた。

p型ドーパント用アルミニウムビームについても同じ方法でビーム特性を評価したので、その結果について述べる。初段加速後のパルス重イオンビームに対して磁場偏向型質量分析器を利用してエネルギーの測定並びにイオン種の同定を行った。その結果を図3に示す。図中の領域(1)は中性粒子によるトラックであり、この中心からの偏向距離から計算されたエネルギーと負極性加速電圧を考慮すると、領域(2)は $80 \sim 180$ keVのアルミニウム1価イオン、領域(3)は約 160 keVの水素イオンによるトラックであると推定できた。次に、二段加速後のパルス重イオンビームのイオン種とエネルギーの同定を行うためにトムソンパラボラ分析器を用いて測定を行った。その結果を図4に示す。偏向距離の計算値(実線)をイオントラックを重ねると、二段階加速後のイオンビームはアルミニウム一価イオンが支配的であり、その時のエネルギーは $80 \sim 320$ keVであった。また、磁場偏向距離からエネルギーを算出すると $60 \sim 340$ keV となっ

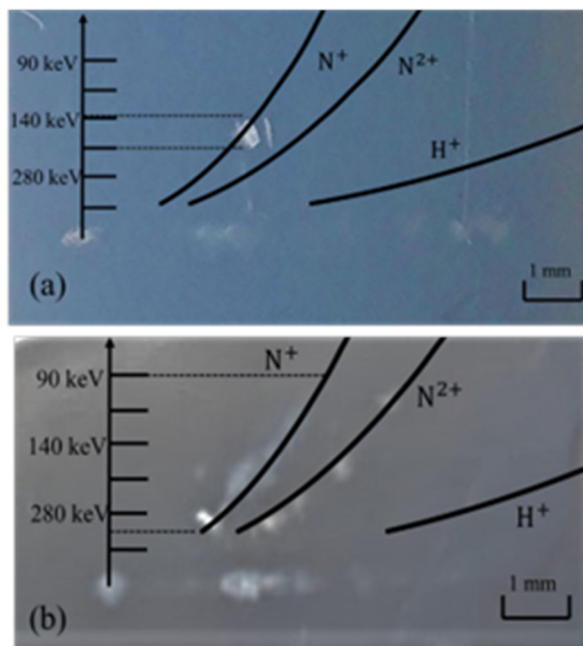


図2 窒素イオンビームに対するイオントラックと理論値曲線との比較 (a)初段加速 (b)二段加速



図3 初段加速後のアルミニウムイオンビームに対する磁場偏向型分析器の結果

た。加速印加電圧を比較すると、得られたエネルギーとほぼ一致するので、アルミニウム一価イオンの二段階加速に成功した。一方、初段加速で検出された水素イオンは二段加速後では検出することができなかったので、イオン純度も向上させることができた。また、初段加速後のアルミニウム1価イオンのエネルギーを考慮してイオン加速の整合条件を満たすドリフト管の長さで設計製作後に二段階加速実験を行った結果、生成されたパルスイオンビームのイオン電流密度を測定した結果、大幅に改善された。

開発したパルス重イオンビーム源を用いて半導体材料へのビーム照射実験を行い、アニール効果やイオン注入効果を検証した。アニール効果においては、初段加速で得られたイオンビームでは十分なビーム電流が得られているために、半導体材料へ与える付与エネルギーは大きく、十分な温度効果が得られ、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。しかし、2段加速後のパルスイオンビームの出力は予想以上に減衰してしまったためにアニール効果を確認することができなかったので、加速の整合条件を再検討したり、電極形状の工夫をしてビーム出力を改善する必要がある。一方、イオン注入の効果については、まだ検証不足であり、明確な結論を得ることはできなかった。

高純度パルスアルミニウムイオンビームの発生成功によって、n型とp型ドーパント用のパルスイオンビーム源が揃ったので、パルスイオン注入法の実験に取り組むことが可能となったが、p-n接合の形成実証には至らなかったため、実験を継続する必要がある。

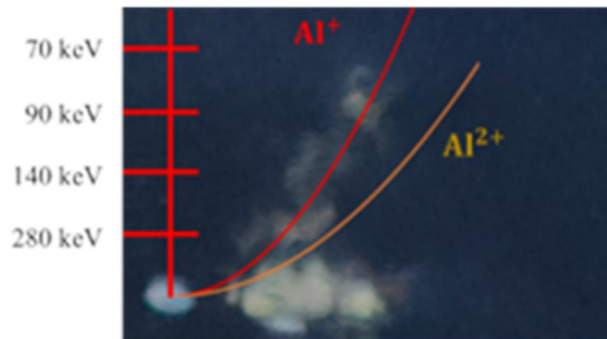


図4 二段加速後のパルスアルミニウムイオンビームに対するトラックパターン

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Honoki, M. Terada, H. Ito	4. 巻 113
2. 論文標題 Energy Evaluation of Pulsed Heavy Ion Beam Accelerated in 1-stage gap of Bipolar Pulse Accelerator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Research Report, NIFS-PROC	6. 最初と最後の頁 34-39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 W. Tagami, A. Fujino, H. Ito, T. Takezaki	4. 巻 123
2. 論文標題 Generation of pulsed aluminum ion beams using a bipolar pulse accelerator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Research Report, NIFS-PROC	6. 最初と最後の頁 67-71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Terada, H. Ishida, H. Ito	4. 巻 124
2. 論文標題 Energy evaluation of pulsed heavy ion beams in bipolar pulsed accelerator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Research Report, NIFS-PROC	6. 最初と最後の頁 25-29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計83件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 12件）

1. 発表者名 藤野 朗、伊藤弘昭、竹崎太智
2. 発表標題 アルミニウムイオン源を組込んだ両極性パルス加速器で生成されるパルスイオンビームの特性評価
3. 学会等名 2023年度核融合科学研究所共同研究研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 藤野朗, 田上航, 伊藤弘昭, 竹崎太智
2. 発表標題 真空アークイオン源を用いた両極性パルス加速器による高強度パルス金属イオンビームの特性
3. 学会等名 第14回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田上航, 藤野朗, 伊藤弘昭, 竹崎太智
2. 発表標題 両極性パルス加速器を用いたパルスアルミニウムイオンビームの発生
3. 学会等名 2021年度核融合科学研究所共同研究研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石田治康, 田中惟与, 田上航, 伊藤弘昭, 竹崎太智
2. 発表標題 両極性パルス加速器におけるパルスイオンビーム特性に及ぼすアノード電極形状の効果
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田上航, 藤野朗, 伊藤弘昭, 竹崎太智
2. 発表標題 アルミニウムイオン源を用いた両極性パルス加速器による高強度パルス重イオンビームの発生
3. 学会等名 2021年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石田治康, 寺田匡志, 伊藤弘昭
2. 発表標題 両極性パルス加速器開発に向けたパルスイオンビームのエネルギー評価
3. 学会等名 放電・プラズマ・パルスパワー研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田上航, 石田治康, 田中惟与, 伊藤弘昭
2. 発表標題 高純度パルス重イオンビーム発生に向けた両極性パルス加速器の開発
3. 学会等名 2020年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石田治康, 寺田匡志, 伊藤弘昭
2. 発表標題 両極性パルス加速器開発に向けたパルスイオンビームのエネルギー評価
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Ishida, W. Tagami, Y. Tanaka, H. Ito
2. 発表標題 Development of bipolar pulse accelerator for high-purity intense pulsed ion beam to material processing
3. 学会等名 47th IEEE International Conference on Plasma Science (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺田匡志, 石田治康, 伊藤弘昭
2. 発表標題 両極性パルス加速器の開発に向けたパルス重イオンビームの特性評価
3. 学会等名 2019年度核融合科学研究所共同研究研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Terada, H. Ishida, H. Ito
2. 発表標題 Characteristic evaluation of pulsed heavy ion beam in bipolar pulse accelerator
3. 学会等名 11th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺田匡志, 石田治康, 伊藤弘昭
2. 発表標題 両極性パルス加速器の2段加速におけるパルス重イオンビームの特性評価
3. 学会等名 令和元年電気学会 基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石田治康, 寺田匡志, 伊藤弘昭
2. 発表標題 トムソンバラボラ分析器を用いた両極性パルス加速器におけるイオンビームのエネルギー分析
3. 学会等名 2019年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺田匡志, 石田治康, 伊藤弘昭
2. 発表標題 両極性パルス加速器におけるパルス重イオンビームの特性評価
3. 学会等名 2019年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関