

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：37401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06387

研究課題名(和文) 液中レーザードーピングにおけるSiC表面温度のその場計測と不純物プロファイル制御

研究課題名(英文) In-situ temperature measurements and impurity profile control on SiC surface during wet chemical laser doping

研究代表者

池田 晃裕 (Ikeda, Akihiro)

崇城大学・情報学部・准教授

研究者番号：60315124

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー光のパルス波形を制御するため、光路の途中にビームスプリッタを設置して2本のビームに光路差を付けて、その光路差を調整することでパルス幅を調整した。パルス幅を50nsから100nsに拡大することでAlの注入深さは100nmから230nmに深くなった。また2色法を用いてレーザー照射時のSiC温度を計測したところSiCの昇華温度に近い3100 K程度であった。またTLM法を用いてAlドーピング箇所とTi/Al電極の固有コンタクト抵抗を測定したところ、ポストアニールなしで $4E-6 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ と非常に低い値が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SiCは次世代パワーデバイス用の材料として期待されている。鉄道車両のインバータなど広く使われ始めているが、一方で価格が高くて普及における課題となっている。本研究で開発した光路差を用いたビーム波形の整形ができるレーザードーピング装置を用いると、従来SiCデバイス作製に用いられてきたイオン注入と同様に、不純物プロファイル制御ができる可能性がある。イオン注入工程はデバイス作製コストの大部分を占めており、これを低コストのレーザードーピング装置と置き換えることで、SiCデバイスのより一層の普及に貢献すると期待される。

研究成果の概要(英文)：The laser pulse width was expanded with a beam expander. The beam expander was composed of optics which split the original laser beam into two beams using a half mirror and the two beams are recombined by using another half mirror. Al doping depth was increased from 100 nm to 230 nm by using the beam expander. Also, temperature on the SiC during the laser doping was measured in-situ by two color pyrometry. The SiC temperature was ~3100 K, which was close to the sublimation temperature of SiC. Furthermore, specific contact resistance between the Al doped region and Ti/Al metal was measured by TLM method. The specific contact resistance was $4E-6 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$. The obtained specific contact resistance was consistent to the Al doping concentration of $1E21 \text{ /cm}^3$ on the SiC surface.

研究分野：半導体プロセス

キーワード：レーザードーピング 4H-SiC パルス波形整形 低コンタクト抵抗

1. 研究開始当初の背景

申請者らは、液体窒素や塩化アルミニウムなど不純物を含んだ水溶液中で SiC にレーザー光を照射すると、n 型不純物である N や、p 型不純物である Al が SiC 内部に高濃度ドーピングされることを発見した。我々は、このドーピング手法をウェットケミカルレーザードーピングと呼んでいる。この方法では、従来と比較して異常に大きな不純物の拡散係数が得られている。また静電容量法や SEM コントラスト法などから Al は p 型に活性化していることが確認されている。一方で、デバイスへの適用を考えると、イオン注入法と同様に高い不純物密度分布の制御性能が求められる。

2. 研究の目的

レーザードーピングの実用化に向けて、ドーピングの機構を解明した上で分布を制御する技術を開発する必要がある。本研究では、ドーピング時の SiC 表面の温度をレーザー光のパルス波形の整形により制御し、表面温度が空孔の発生や不純物プロファイルに与える影響を調べることで、ドーピング機構の解明を目指す。

3. 研究の方法

レーザー光のパルス波形を制御するため、図 1 に示すように光路の途中でビームスプリッタを設置して 2 本のビームに光路差を付けたあと、それを再度合成した。光路差を調整することでパルス波形の幅を調整できる。図 2 にビームスプリッタ有り、無しそれぞれのビーム波形を示す。以下、ビームスプリッタ有りをロングパルス、無しをショートパルスと呼ぶ。

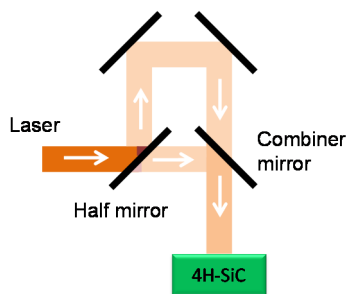


図 1. ビームスプリッタによる光路差を付けたレーザー光路。

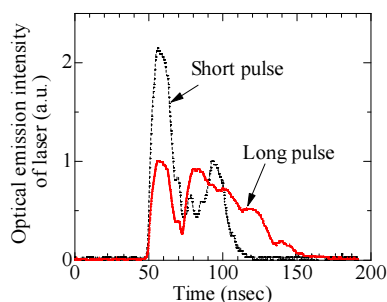


図 2. ビームスプリッタ有り、無し
のレーザーパルス波形

また、2 色法によるレーザー照射中の SiC 温度検出を試みた。図 3 に 2 色法による温度検出装置の模式図を示す。黒体放射を仮定してプランクの公式から温度の導出を試みた。

さらに、SiC 中に Al のみ、及び C と Al をインプラした試料にレーザー照射して Al の活性化率の違いを調べた。C を Al と同時に注入すると SiC 中に C 空孔がより多く導入される。Al の増速拡散や活性化はレーザー照射により発生した Si や C 空孔に関連すると考えており、空孔が Al 活性化に与える影響を調査した。また、TLM 法を用いて Al ドーピング領域と金属電極のコンタクト抵抗の測定を行った。

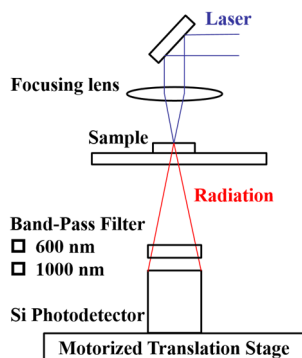


図 3. 2 色法による SiC 温度検出の模式図。

4. 研究成果

図4(a), (b)にロングパルス, ショートパルスを用いたときのSiC中のAl分布を示す. ロングパルスを用いると, より深くAlが注入できている. パルス波形を整形することで, Al分布を制御できる可能性があることが示された.

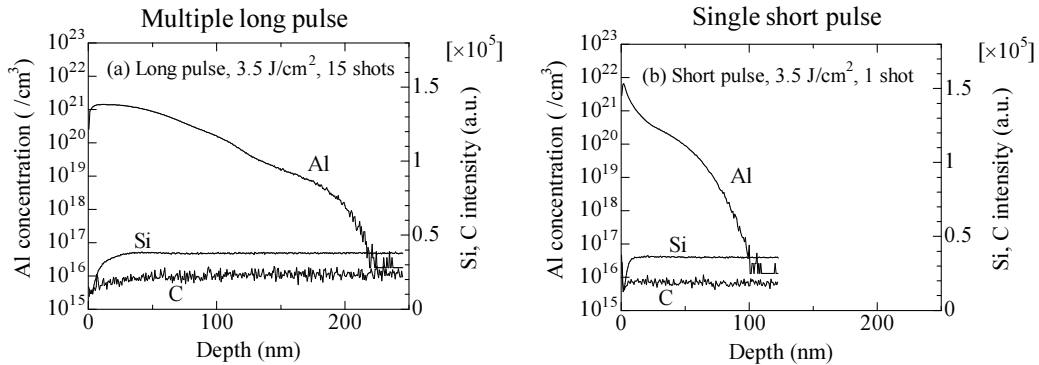


図4. (a) ロングパルス, (b)ショートパルスを用いたレーザードーピングによるSiC中Alの分布.

図5にロングパルス, ショートパルスを照射したときのSiC表面の削れ深さを示す. ショートパルスのほうは1ショットでも50~100nm程度と深く削れている. ショット数を増やすと削れが顕著となりショット数を増やすことができなかった.

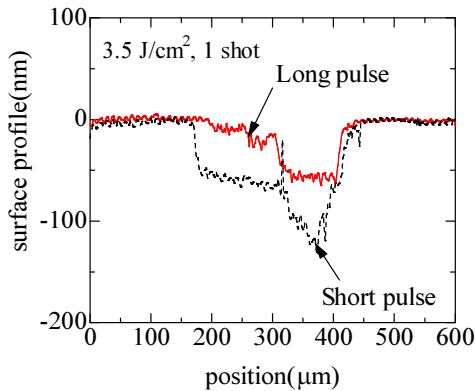


図5. 1ショット照射時のSiC表面の削れ深さ.

図6に2色法によるレーザー照射時のSiCからの放射光の測定結果を示す. 波長1000 nm, 600 nmの放射光を測定した. レーザパワーがピークになる時間から100ns程度遅れて放射光は最大となった. この測定結果をもとにSiCの温度を導出した結果を図7に示す. 黒体放射を仮定してプランクの式から温度を求めた. ピーク温度は3100 K程度でSiC昇華温度に近い. 180ns以降, 温度が増加している. 放射光の強度が下がり, これ以降は正しく測定できていないと考えられる.

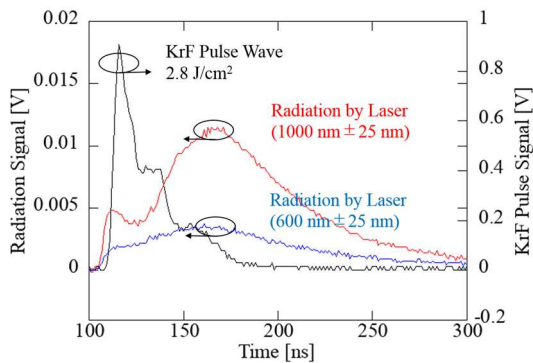


図6. 2色法の測定結果.

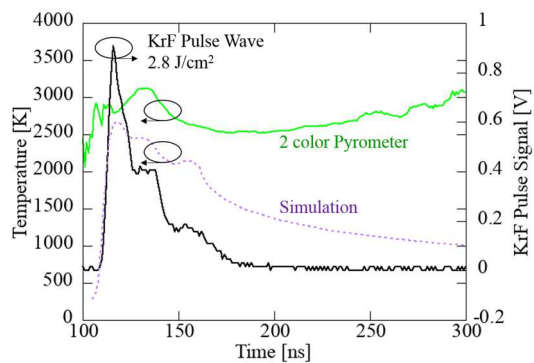


図7. 2色法から求めたSiC温度 (緑線)

図 8 に Al インプラ, C/Al インプラした SiC へレーザを照射して照射箇所シート抵抗を測定した結果を示す. フルーエンスの増加に伴いシート抵抗は減少している. フルーエンスが高くなると SiC 中に Si や C 空孔が形成され, その空孔に Al が入ることで活性化しているためと推察される. また, C を注入したほうがシート抵抗が低いことがわかる. これは Al のみよりも C を注入したほうが SiC 中により多くの C 空孔が形成されているためと思われる. 形成された多数の C 空孔に, あるいは C 空孔が拡散することで発生した Si 空孔にレーザ照射することで Al が入り活性化したと思われる. レーザドーピング時も同様に SiC 中に C, あるいは Si 空孔が発生し, その空孔を介した Al の拡散, 及び活性化が起こっていると推察している.

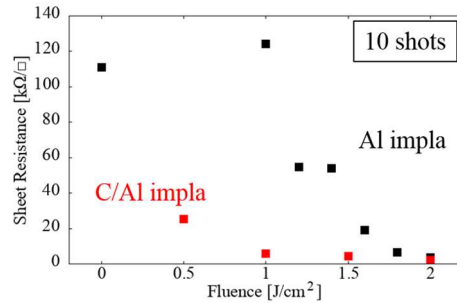


図 8. Al, C/Al インプラした SiC へのレーザ照射とシート抵抗測定結果.

図 9 に TLM 法による Al ドーピング領域のシート抵抗測定の模式図を示す. SiC はノンドーピング基板を用いた. レーザ照射後のポストアニールは行っていない. 電極は Ti/Al を用いた. 図 10 に TLM 測定の結果を示す. 横軸は電極間の距離である. 高濃度に Al が表面ドーピングされているため, ポストアニール無しでもオーミックコンタクトを示した. TLM 法により導出された固有コンタクト抵抗は $4.0 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ と低い値が得られた.

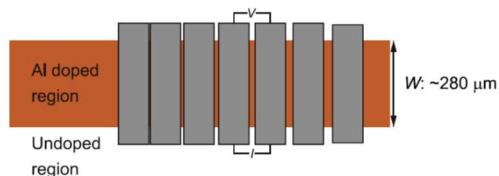


図 9. TLM 測定の Al ドーピング領域と電極パターン

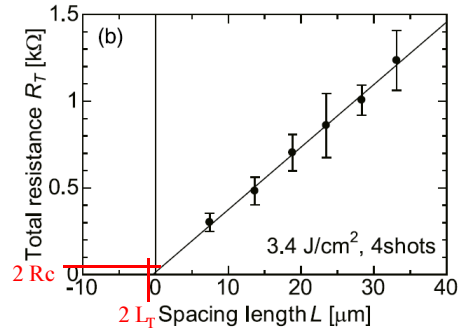


図 10. TLM 測定結果.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 A. Ikeda, D. Marui, R. Sumina, H. Ikenoue, T. Asano	4. 巻 70
2. 論文標題 Increased doping depth of Al in wet-chemical laser doping of 4H-SiC by expanding laser pulse	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Materials Science in Semiconductor Processing	6. 最初と最後の頁 193-196
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） http://dx.doi.org/10.1016/j.mssp.2016.11.036	査読の有無 有
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 K. Okamoto, T. Kikuchi, A. Ikeda, H. Ikenoue, T. Asano	4. 巻 58
2. 論文標題 Formation of low resistance contacts to p-type 4H-SiC using laser doping with an Al thin-film dopant source	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 SDDF13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab12c3	査読の有無 有
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 A. Ikeda, T. Shimokawa, H. Ikenoue, T. Asano	4. 巻 963
2. 論文標題 Increasing Laser-Doping Depth of Al in 4H-SiC by Using Expanded-Pulse Excimer Laser	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 412-415
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.963.412	査読の有無 有
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 K. Imokawa, T. Kikuchi, K. Okamoto, D. Nakamura, A. Ikeda, T. Asano, H. Ikenoue	4. 巻 963
2. 論文標題 High-Concentration, Low-Temperature, and Low-Cost Excimer Laser Doping for 4H-SiC Power Device Fabrication	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 403-406
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.963.403	査読の有無 有
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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 K. Okamoto, A. Ikeda, T. Kikuchi, H. Ikenoue, T. Asano
2. 発表標題 Room Temperature Processing of Low Resistance Contacts to p-type 4H-SiC using Laser Doping
3. 学会等名 International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kikuchi, K. Imokawa, A. Ikeda, D. Nakamura, T. Asano, H. Ikenoue
2. 発表標題 Laser doping for 4H-SiC power-device fabrication with laser pulse-duration controller
3. 学会等名 LiM 2019, Lasers in Manufacturing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kikuchi, K. Imokawa, A. Ikeda, D. Nakamura, T. Asano, H. Ikenoue
2. 発表標題 Low-temperature, high-concentration laser doping of 4H-SiC for low contact resistance
3. 学会等名 SPIE Photonics West (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Ikeda, T. Shimokawa, H. Ikenoue, T. Asano
2. 発表標題 Increasing Laser-Doping Depth of Al in 4H-SiC by Using Expanded-Pulse Excimer Laser
3. 学会等名 European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Imokawa, T. Kikuchi, D. Nakamura, A. Ikeda, T. Asano, H. Ikenoue
2 . 発表標題 High-concentration, Room Temperature, and Low-cost Excimer Laser Doping for 4H-SiC Power Device Fabrication
3 . 学会等名 European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM 2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Kikuchi, K. Imokawa, A. Ikeda, D. Nakamura, T. Asano, H. Ikenoue
2 . 発表標題 Low-temperature, high-concentration laser doping of nitrogen to 4H-SiC for low-contact-resistance fabrication
3 . 学会等名 2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Okamoto, T. Kikuchi, A. Ikeda, H. Ikenoue and T. Asano
2 . 発表標題 Formation of Low Resistance Contacts to p-type 4H-SiC by Using Laser Doping with Al Thin-Film Dopant Source
3 . 学会等名 31th International Microprocesses and Nanotechnology conference (MNC 2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 A. Ikeda, R. Sumina, R. Tsutsui, A. Suwa, H. Ikenoue, T. Asano
2 . 発表標題 Improved doping performance of laser Al doping in 4H-SiC by substrate heating
3 . 学会等名 ICSCRM 2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017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
--	---------------------------	-----------------------	----