

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360001

研究課題名(和文) イオン注入による欠陥制御を利用した圧縮歪みシリコンの実現と高正孔移動度素子応用

研究課題名(英文) Realization of compressively strained silicon by defect control using ion implantation and application to high hole mobility devices

研究代表者

宇佐美 徳隆 (Usami, Noritaka)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20262107

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：イオン注入により意図的に残留欠陥を発生させたシリコン(100)基板上にガスソース分子線エピタキシー法を用いてシリコン/シリコンカーボンヘテロ構造を結晶成長することで、二軸性圧縮歪みを有するシリコン薄膜を形成できることを示した。この薄膜は800度までの熱処理に対して安定であるが、900度以上の熱処理ではカーボン原子の析出が生じる。また、アルゴンイオン注入を利用して高品質な圧縮歪みシリコン/シリコンカーボンヘテロ構造を実現するための注入エネルギーは45keV未満が望ましいことを見出した。

研究成果の概要(英文)：We obtained compressively strained silicon/silicon-carbon heterostructures on argon ion implanted silicon (100) substrates. The heterostructure was found to be stable at 800 degree Celsius and reduction of substitutional carbon was found with annealing more than 900 degree Celsius. Implantation energy must be smaller than 45keV to obtain high-quality heterostructures.

研究分野：結晶工学

キーワード：歪みシリコン ヘテロ構造 分子線エピタキシー

1. 研究開始当初の背景

Siは、LSIや太陽電池の基盤材料として、社会の持続的な発展を根幹で支えている。Siは、資源が豊富で枯渇する恐れがなく、化学的に安定で安全であり、社会的受容性が高い。これまでの数十年にわたる絶え間ない技術開発の蓄積や、大規模製造技術のインフラが整備されていることを鑑みると、今後もSiをベースとした材料・デバイス開発の重要性には揺るぎがない。

一方、LSIの分野では、基本素子であるMOSFET(電界効果型トランジスタ)の微細化において解決困難な問題が顕在化し、素子サイズの縮小化による高集積化・高速化という従来の高性能化手法が限界を迎えつつあるのも現実である。微細化によらない高性能化・高機能化手法が、世界中で精力的に研究されている。我々は、SiとSiGeとのヘテロ構造による「歪み」や電子帯の制御に、いち早く注目し研究を進めてきた。これまでに、SiGe擬似基板の超薄膜化・超高品質化法の開発、高効率共鳴発光の観測、Siへの伸長歪み印加による世界最高電子移動度の達成など、結晶成長、光電子物性、デバイスにわたる広範な研究領域において、世界トップレベルの実績を数多く挙げている。

上記の研究過程において、次世代LSIの高性能化に向けた最大の課題は、伸長歪みSiの導入によって達成された移動度の向上が、電子と比較して正孔では不十分なため、相補型電界効果型トランジスタ(CMOS)デバイスの高性能化が阻害されていることであり、正孔移動度を飛躍的に高めるチャンネルの研究開発が極めて重要であると考えに至った。チャンネル材料としては、Si単体であることが望ましいと考え、歪みや面方位の制御による有効質量低下の可能性を、Schockleyの理論に立ち返り、数値計算により探索した。その結果、歪みの符号を従来から反転させるだけで極めて大きな効果があることを発見した。(100)面方位のSiにわずか1%の圧縮歪みの印加により、有効質量を無歪みSiの1/2以下に、伸長歪みSiに対しても1/2程度に低減可能となるのである。これは、正孔移動度を2倍以上にし、消費電力/動作周波数を4倍以上も向上できる大きな効果をもたらす。この独自の計算結果がベースとなり、本研究において、次世代LSIの高性能化に向けた革新的高正孔移動度チャンネル材料として「圧縮歪みSi」を提案するに至った。

2. 研究の目的

次世代LSIの高性能化に向けた革新的高移動度チャンネル材料として、従来の概念とは歪みの符号が反対である「圧縮歪みSi」を、独自に行った有効質量の理論予測に基づいて提案し、その有用性の実証を行う。Siへ圧縮歪みを印加するには、Siよりも格子定数の小さい歪み緩和したシリコンカーボン(Si_{1-x}C_x)を擬似基板として、Si薄膜をエピタ

キシャル成長することが不可欠である。本研究では、Si_{1-x}C_xの歪み緩和メカニズムを、イオン注入による結晶欠陥の意図的な導入などの独自手法を駆使して解明し、得られた知見に立脚して高品質な圧縮歪みSi/歪み緩和Si_{1-x}C_xへテロ構造の成長技術を開発する。さらに、圧縮歪みSiをチャンネルに用いたMOSFETを作製し、正孔移動度の増加によりその有用性を実証する。

3. 研究の方法

本研究では、Si基板にイオン注入により意図的に結晶欠陥を導入することで、転位発生を制御し、歪み緩和を促進させ、Cの格子位置への効果的な取り込みと歪み緩和を両立させる。イオン注入によって導入した結晶欠陥は、転位の発生源となり、歪み緩和を促進することが、SiGe擬似基板の成長において申請者らの研究によって明らかとなっている。SiGeの場合、従来技術の組成傾斜法と比較して、歪み緩和に必要な膜厚を1/10以下とし、表面粗さを1/100以下に低減できる効果的な手法である。このような実績に基づいて、Si_{1-x}C_xの成長に、初めてイオン注入法を適用する。

4. 研究成果

4-1 イオン注入による欠陥制御を利用した圧縮歪みSiの実現

Si(100)基板に注入エネルギー25keV、注入ドーズ量 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ の条件でArイオンを注入した。その後700°Cで10分間、N₂雰囲気中で結晶性回復アニールを行った。これにより、Si基板表面近傍に残留欠陥が形成される。ガスソース分子線エピタキシー(GSMBE)法により、この基板上に膜厚が20-200nmのSi_{1-x}C_x層、膜厚20nmのSi層を連続的に成長した。参照用試料として、イオン注入を施さない場合の試料も作製した。

図1(a)と1(b)にイオン注入有りと無しそれぞれの試料に対する(224)X線回折逆格子空間マッピングを示す。これらの試料はSi_{1-x}C_x層膜厚が110nmとなるように作製した。イオン注入無しの試料では、Si_{1-x}C_x層が完全歪みで成長されており、イオン注入有りの試料では、完全緩和で成長されている。これは、イオン注入により生じる欠陥がSi_{1-x}C_x層の歪み緩和を促進させたことを示している。また、C組成xは、歪み緩和した試料で増加する傾向にあり、Si_{1-x}C_x層が歪み緩和するとC原子が置換格子位置に取り込まれやすくなることを示唆している。これらの試料についてラマン分光法を利用し表面Si層の歪み量を調べたところ、イオン注入有りの試料では、0.8%の面内圧縮歪みが導入されていることが分かった。これは、完全緩和Si_{0.982}C_{0.018}層上にSi層を成長させた場合に生じる圧縮歪み量とほぼ一致しており、完全圧縮歪みSi層が形成できたことを示している。

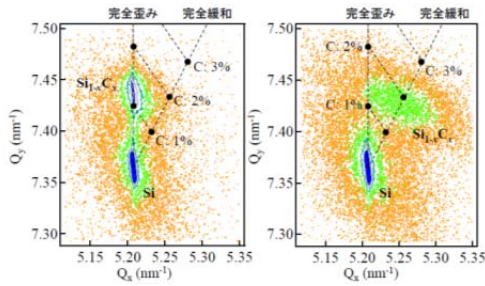


図 1(a)イオン注入無しと(b)イオン注入有りの試料に対する(224)X 線回折逆格子空間マッピング

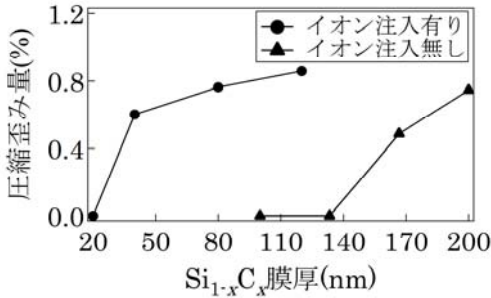


図 2 表面 Si 層の圧縮歪み量の Si_{1-x}C_x 膜厚依存性

次に、表面 Si 層の面内圧縮歪み量における Si_{1-x}C_x 層膜厚依存性を図 2 に示す。Si_{1-x}C_x 層膜厚の増大により、表面 Si 層の歪み量が増大していることが分かる。この歪み量増大は、Si_{1-x}C_x 層の緩和率増大を表しており、Si_{1-x}C_x 層が歪み緩和する臨界膜厚は、イオン注入有りの試料では 20-30nm、イオン注入なしの試料では 140-170 nm であることが分かった。

これらの結果により、Ar イオン注入により生じる欠陥を利用することで、Si_{1-x}C_x 層の歪み緩和を促進できることが分かった。この緩和 Si_{1-x}C_x 層上では、完全圧縮歪み Si が形成されており、その歪み量は Si_{1-x}C_x 層膜厚を変化させることで制御できることが示された。

4-2 圧縮歪み Si/Si_{1-x}C_x ヘテロ構造の熱的安定性

Si_{1-x}C_x 中の C 原子は高温熱処理により析出することが知られており、これにより置換格子位置の C 原子密度が低減するため、圧縮歪み Si の歪み量が減少してしまうことが懸念される。そこで、イオン注入法を利用し作製した Si/Si_{1-x}C_x ヘテロ構造の熱的安定性について検討を行った。

まず Si(100)基板に Ar イオン注入を 25keV、 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ の条件で施し、700°C で 10 分間、窒素雰囲気中で再結晶化熱処理を行った。次に、GSMBE 法を用いて Si_{1-x}C_x 層を結晶成長させ、その上に連続的に Si を結晶成長させることで Si/Si_{1-x}C_x ヘテロ構造を作製した。この試料を温度 500-1000°C、時間 10 分および 60 分、大気中で熱処理を行った。

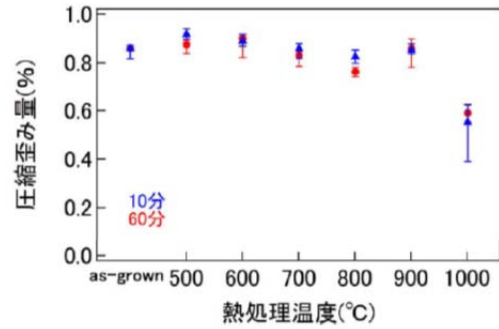


図 3 表面 Si 層の圧縮歪み量の熱処理温度依存性

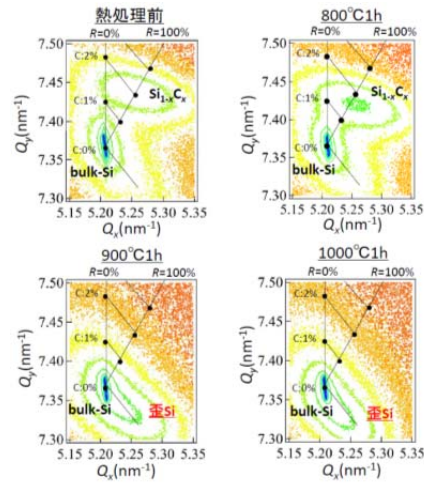


図 4 (224)X 線回折逆格子空間マッピングの熱処理温度依存性

図 3 に表面 Si 層の圧縮歪み量の熱処理温度依存性を示す。歪み量は、900°C まで安定であるが、1000°C では減少した。

図 4 に熱処理した試料の(224)X 線回折逆格子空間マッピングを示す。Si_{1-x}C_x 層からの回折ピークは 800°C までは、明瞭に観測されるが、900°C 以上の熱処理ではピークが見られなくなる。変わって、圧縮歪み Si に起因するピークが出現するという興味深い現象が観測された。イオン注入を行っていない参照試料では、1000°C 熱処理において、バルク Si からのピークのみが観測された。

この要因として、イオン注入効果により、Si 基板との界面付近の置換格子 C 原子がトラップされ、熱処理後も薄い Si_{1-x}C_x 層が維持されたことが考えられる。Si_{1-x}C_x 層の上部では、全ての置換格子 C 原子が析出するが、下部にある緩和 Si_{1-x}C_x 層の影響により、圧縮歪み Si が形成されたと思われる。

この結果より、圧縮歪み Si/Si_{1-x}C_x 層は、800°C までは、熱的に安定であるが、より高温の熱処理においては、置換格子 C 原子の析出とイオン注入による欠陥との相互作用により、厚い圧縮歪み Si 層の形成など複雑な現象が生じることが分かった。

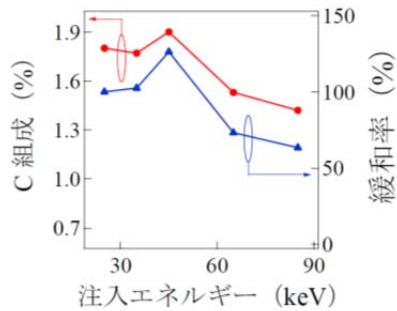


図 5 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 層の C 組成と緩和率の注入エネルギー依存性

4-3 圧縮歪み Si/緩和 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ ヘテロ構造の作製におけるイオン注入条件の検討

これまでのイオン注入条件は必ずしも最適であるとは限らず、更なる圧縮歪みの導入や結晶性の向上を目指す上でイオン注入条件に関する知見を深めることが重要である。そこで、イオン注入条件が圧縮歪み Si/緩和 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ ヘテロ構造に与える影響を調べた。

まず、注入エネルギーを 25-85keV、注入ドーズ量を $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ と固定した条件で Si(100) 基板に Ar イオンを注入した。その後 700°C で 10 分間、 N_2 雰囲気中でアニールを行い、基板表面の結晶性を回復させるとともに、表面近傍に残留欠陥を生じさせた。この基板上に GSMBE 法で、成長温度 550°C で膜厚 140nm の $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 層と膜厚 20nm の Si 層を連続的に成長した。試料作製後、X 線回折逆格子空間マッピングで $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 層の緩和率と C 組成を、ラマン分光法で表面 Si 層の圧縮歪み量を、原子間力顕微鏡で試料表面の RMS 粗さを、それぞれ評価した。

$\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 層の C 組成と緩和率の注入エネルギー依存性を図 5 に示す。緩和率が高いほど C 組成が増大するという緩和 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 特有の性質が見て取れる。さらに、注入エネルギー 45keV で緩和率は最大値 125% となっている。イオン注入を利用して作製した緩和 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 層にアニールを行うと置換格子 C 原子の一部が析出するが、 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 層の面内格子定数はアニール前後でほぼ変化しないことが知られている。注入エネルギーが 25-45keV の試料では、結晶成長の比較的初期の段階で C 組成が大きな $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 層が成長され、時間の経過とともにアニール効果により面内格子定数を保ったまま C 原子の析出が起こったこと

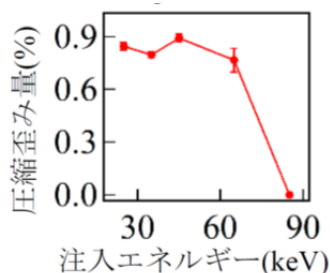


図 6 表面 Si 層の圧縮歪み量の注入エネルギー依存性

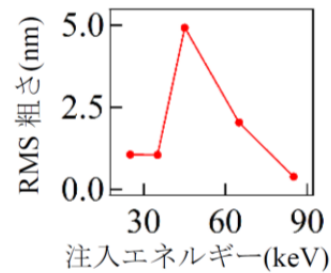


図 7 試料表面の RMS 粗さの注入エネルギー依存性

で緩和率が 100% を超えたのではないかと考えられる。

表面 Si 層の圧縮歪み量の注入エネルギー依存性を図 6 に示す。図から、注入エネルギーが 45keV で圧縮歪み量が最大であることが分かる。これは、C 組成と緩和率が 45keV で最大となることで bulk-Si との格子不整合度が最大となったためである。また、図 5 と図 6 から、注入エネルギーが 65keV 以上の試料では C 組成・緩和率・圧縮歪み量が全て小さいことが分かる。これは、注入エネルギーが高いと Si 基板中の残留欠陥の位置が深くなり、歪み緩和のための転位源として効果的に機能しにくくなることを示している。試料表面の RMS 粗さは、注入エネルギー 45keV で最大であり、緩和率が大きいほど表面ラフネスが増大する傾向が見られる (図 7)。

これらの結果より、Ar イオン注入を利用して高品質な Si/ $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ ヘテロ構造を作製する際、注入エネルギーは 45keV 未満が望ましいということが示唆される。

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 2 件)

(1) Keisuke Arimoto, Shoichiro Sakai, Hiroshi Furukawa, Junji Yamanaka, Kiyokazu Nakagawa, Noritaka Usami, Yusuke Hoshi, Kentarou Sawano, Yasuhiro Shiraki, "Gas-source MBE growth of strain-relaxed $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ on Si(100) substrates", J. Cryst. Growth **378**, 212-217, 2013 査読有
DOI:10.1016/j.jcrysgro.2012.12.152

(2) Yusuke Hoshi, You Arisawa, Keisuke Arimoto, Junji Yamanaka, Kiyokazu Nakagawa, Kentarou Sawano, and Noritaka Usami, "Compressively strained Si/ $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ heterostructures formed on Ar ion implanted Si(100) substrates", Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 031302, 2016 査読有
DOI:10.7567/JJAP.55.031302

[学会発表] (計 16 件)

(1) 中込諒、酒井翔一郎、藤原幸亮、古川洋志、有元圭介、山中淳二、中川清和、宇佐美徳隆、星裕介、澤野憲太郎、白木靖寛、圧縮歪み $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{C}_x/\text{Si}(100)$ 構造を用いた MOSFET に関する研究、第 2 回結晶工学未来塾、2013 年 11 月 07 日～2013 年 11 月 07 日、学習院大学

(2) 藤原幸亮、酒井翔一郎、古川洋志、井上樹範、有元圭介、山中淳二、中川清和、宇佐美徳隆、星裕介、澤野憲太郎、白木靖寛、 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 混晶半導体の不純物活性化プロセスにおける結晶欠陥形成過程の解明、第 2 回結晶工学未来塾、2013 年 11 月 07 日～2013 年 11 月 07 日、学習院大学

(3) 酒井翔一郎、古川洋志、有元圭介、山中淳二、中川清和、宇佐美徳隆、星裕介、澤野憲太郎、圧縮歪み $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{C}_x/\text{Si}(100)$ ヘテロ構造における炭素傾斜組成の電気伝導特性への効果、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、2014 年 3 月 17 日～2014 年 3 月 20 日、青山学院大学

(4) 藤原幸亮、酒井翔一郎、古川洋志、井上樹範、有元圭介、山中淳二、中川清和、宇佐美徳隆、星裕介、澤野憲太郎、不純物イオン注入および熱処理が $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ 層の結晶性に及ぼす影響、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、2014 年 3 月 17 日～2014 年 3 月 20 日、青山学院大学

(5) 中込諒、酒井翔一郎、藤原幸亮、古川洋志、有元圭介、山中淳二、中川清和、宇佐美徳隆、星裕介、澤野憲太郎、イオン注入法が $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x/\text{Si}(001)$ 構造の欠陥形成過程に及ぼす効果、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、2014 年 3 月 17 日～2014 年 3 月 20 日、青山学院大学

(6) 中込諒、酒井翔一郎、藤原幸亮、古川洋志、有元圭介、山中淳二、中川清和、宇佐美徳隆、星裕介、澤野憲太郎、イオン注入法で作成した圧縮歪み $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{C}_x/\text{Si}(100)$ 構造の結晶性及びデバイス特性評価、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014 年 9 月 17 日～2014 年 9 月 20 日、北海道大学

(7) 藤原幸亮、酒井翔一郎、古川洋志、井上樹範、有元圭介、山中淳二、中川清和、宇佐美徳隆、星裕介、澤野憲太郎、歪み $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{C}_x/\text{Si}(001)$ 構造の不純物活性化過程における結晶性及び電気特性評価、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014 年 9 月 17 日～2014 年 9 月 20 日、北海道大学

(8) 中込諒、酒井翔一郎、藤原幸亮、有元圭介、山中淳二、中川清和、宇佐美徳隆、星裕介、澤野憲太郎、イオン注入成長法で作製し

た圧縮歪み $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{C}_x/\text{Si}(001)$ 構造 MOSFET の電気特性評価、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、2015 年 3 月 11 日～2015 年 3 月 14 日、東海大学

(9) 藤原幸亮、酒井翔一郎、小林昭太、有元圭介、山中淳二、山中淳二、中川清和、宇佐美徳隆、星裕介、澤野憲太郎、歪み $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{C}_x/\text{Si}(001)$ ヘテロ構造の結晶性と不純物活性化過程との関係、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、2015 年 3 月 11 日～2015 年 3 月 14 日、東海大学

(10) 有澤洋、星裕介、藤原幸亮、山中淳二、有元圭介、中川清和、澤野憲太郎、宇佐美徳隆、Ar イオン注入法を用いた圧縮歪み $\text{Si}/$ 緩和 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ ヘテロ構造の作製、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、2015 年 3 月 11 日～2015 年 3 月 14 日、東海大学

(11) Y. Hoshi, K. Arimoto, K. Sawano, Y. Arisawa, K. Fujiwara, J. Yamanaka, K. Nakagawa, and N. Usami, Compressively strained Si/relaxed $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ heterostructures formed by Ar ion implantation technique, 9th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures (ICS19), 2015 年 5 月 17 日～2015 年 5 月 22 日, Montreal

(12) 有澤洋、星裕介、有元圭介、山中淳二、中川清和、澤野憲太郎、宇佐美徳隆、イオン注入による欠陥制御を用いて作製した圧縮歪み $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ ヘテロ構造の熱的安定性、第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、2015 年 9 月 13 日～2015 年 9 月 16 日、名古屋国際会議場

(13) 有澤洋、澤野憲太郎、宇佐美徳隆、イオン注入を利用した圧縮歪み $\text{Si}/$ 緩和 $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ ヘテロ構造の作製におけるイオン注入条件の検討、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、2016 年 3 月 19 日～2016 年 3 月 22 日、東京工業大学

(14) 宇津山直人、佐藤圭、山田崇峰、有元圭介、山中淳二、中川清和、原康祐、宇佐美徳隆、澤野憲太郎、微傾斜基板を用いた伸長歪み $\text{Si}/$ 緩和 $\text{SiGe}/\text{Si}(110)$ ヘテロ構造のモフォロジー及び素子特性、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、2016 年 3 月 19 日～2016 年 3 月 22 日、東京工業大学

(15) You Arisawa, Yusuke Hoshi, Kentarou Sawano, Junji Yamanaka, Keisuke Arimoto, Chiaya Yamamoto, Noritaka Usami, Thermal stability of compressively strained Si/relaxed $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$ heterostructures formed on Ar ion implanted $\text{Si}(100)$ substrates, 7th International Symposium

on Control of Semiconductor Interfaces
(ISCSI7), 2016年6月7日～2016年6月11
日, Nagoya University

(16) You Arisawa, Kentarou Sawano,
Noritaka Usami, Study on ion
implantation conditions in fabricating
compressively strained Si/relaxed Si_{1-x}C_x
heterostructures using the defect control
by ion implantation technique, The 18th
International Conference on Crystal
Growth and Epitaxy (ICCGE-18), 2016年8
月7日～2016年8月12日, Nagoya

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ

[http://www.numse.nagoya-u.ac.jp/photoni
cs/](http://www.numse.nagoya-u.ac.jp/photoni
cs/)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宇佐美 徳隆 (USAMI, Noritaka)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：20262107

(2) 研究分担者

有元 圭介 (ARIMOTO, Keisuke)

山梨大学・総合研究部・准教授

研究者番号：30345699

(3) 研究分担者

澤野 憲太郎 (SAWANO, Kentaro)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：90409376