

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：34303

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02044

研究課題名(和文) Zn/Al/Niハイブリッド機能膜を用いた新奇SiCパワー素子接合プロセスの創出

研究課題名(英文) A Novel SiC Power Device Bonding Technology Using Zn/Al/Ni Functional Film

研究代表者

生津 資大 (Namazu, Takahiro)

京都先端科学大学・工学部・教授

研究者番号：90347526

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、SiCパワーデバイスの将来のクラックフリーダイボンディングの実現に向け、レーザーを用いて複数点同時照射できる反応誘起システムを設計開発し、Al/Ni多層膜を2点から同時反応誘起させて形成されるクラッキングの振舞いを詳細に調べた。具体的には、バイレイヤーや原子比の異なるAl/Ni多層膜をスパッタリングで作製し、それに対して2点同時反応誘起させて反応の衝突位置の制御を試みた。結果、狙った位置に反応を衝突させてクラックを人為形成させることに成功した。また、Al/Ni多層膜にBを添加して反応させると高靱化し、結果として反応衝突位置以外に形成されるマイクロクラックを抑制できることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、2050年の自動車組み立て工程ゼロエミッション化に向けて、ほぼゼロエネルギーでゼロエミッションなAl/Ni自己伝播発熱多層膜を用いたSiCパワー素子の瞬間ダイボンディング技術の確立を目指した。この技術の問題は接合部位にポイドやクラックが形成され、機械的強度や熱的物性に悪影響が及ぶことである。問題解決のため、Al/NiにBを添加して反応後のNiAl合金を高靱化してポイドやクラックを抑制することに成功した。また、複数点同時反応誘起技術を開発してクラックを人為的に形成できることを実証した。これらの成果は上記目標達成に強力に貢献し、パワーデバイス作製の新たな標準工程になると期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, toward the realization of future crack-free die bonding for SiC power devices, we designed and developed a reaction induction system that can simultaneously irradiate multiple points using a laser, and simultaneously induced reactions in Al/Ni multilayer films from two points. The behavior of the formed cracking was investigated in detail. Specifically, Al/Ni multilayer films with different atomic ratios and different bilayer thicknesses were fabricated by sputtering, and two simultaneous reactions were induced on the films to control the reaction collision position. As a result, we succeeded in artificially forming a large crack by colliding the reaction at the target position. In addition, it was found that adding B to the Al/Ni multilayer film made it tougher, and as a result, microcracks formed other than the reaction collision position could be suppressed.

研究分野：ナノメカニクス, ナノテクノロジー, 機能性材料

キーワード：Al/Ni自己伝播発熱多層膜 瞬間接合 多点同時反応誘起技術 クラック制御 ポイド抑制 高靱化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

SiC は耐食性、耐熱性に優れ、高剛性、高熱伝導、低熱膨張、低比重等の特長を持つだけでなく、Si パワーデバイスの性能限界を大幅に突破するワイドバンドギャップ半導体であることから、電気・水素自動車に用いられる次世代のパワー半導体材料として注目されている。一方、その機械的高剛性ならびに化学的不活性さにより、ウェハ製造や複雑な三次元加工ならびに接合等、実用のための一連の生産加工が極めて困難な材料でもある。よって、車載用パワー半導体素子の実装プロセスには高コスト・高エネルギー・低スループット等の課題があり、技術的なハードルは極めて高い。

この種の課題を“素材の機能”を使って解決できる可能性がある。この機能素材は、軽金属と遷移金属をナノの厚みで積層堆積させた金属多層膜であり、外部からスパーク等の微小刺激を印加することで化合物へと瞬時に変わり、その過程で発熱する。局部での発熱が周囲の反応を誘発するエネルギーとして使われるため、発熱反応が多層膜内を 10m/s 程度で高速自己伝播するという興味深い特徴を示す。研究代表者らは、この瞬間発熱素材をはんだ溶融熱源として利用した新たなウェハ接合プロセスを提案してきた。しかし、Al/Ni 多層状態から NiAl 化合物への変化で体積収縮が生じ、これに起因した接合体内部へのクラック導入が大きな課題であり、問題解決に向けた学術的理解と新技術構築が切望されてきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、機械刺激で発熱反応誘起できる Al/Ni 多層膜の自己伝播発熱機能とクラック形成ルールを巧みに利用し、パルスレーザーの多点同時照射技術を使って SiC ウェハの接合とダイシングを連続的かつ極短時間に実行する新規半導体加工プロセスを構築することである(図1)。本研究開発の学術的独自性と創造性として、

- 1) パルスレーザーの多点同時照射技術を使って Al/Ni 発熱素材を使った瞬間接合の欠点であった体積収縮に起因するクラックの位置と向きを制御すること、
 - 2) 反応後に十分な延性を持つ NiAl を創ることで SiC チップ単位ではクラックフリー接合を実現すること、
 - 3) SiC ウェハの瞬間接合とダイシングを一つの加工工程で連続的かつ 10 秒未満で完了できる新たな接合ダイシング装置とレシピを開発すること、
 - 4) 自作の三源 dc スパッタ装置を用いて従来の SnAg はんだの代替となる ZnAl と Al/Ni 発熱体のハイブリッド機能膜 (Zn/Al/Ni 多層膜) を創り、コンビナトリアル法で発熱性能と接着性能の最適化を図ること、
 - 5) SiC パワー半導体チップと Cu 放熱板の接合を加圧刺激のみで 1 秒未満に完了すること、
- が挙げられる。いずれも、研究代表者のこれまでの独自研究で得られた知見に基づく唯一無二の技術とアイデアであり、世界的にも類を見ない。また、Al/Ni 多層膜は、スパーク電気刺激、ピンセット機械刺激、レーザーパルス等の極微小エネルギーで発熱反応を誘起でき、しかも 10m/s 程度で高速自己伝播する特徴を持つ。加えて、反応には酸素不要のため、不活性ガス中、真空中、水中でも大気中と同等の発熱反応が生じ、かつ、アウトガスがない。すなわち、省エネ&エコな機能性材料である。この材料を、今後、生産台数の急増が見込まれる電気・水素自動車の SiC パワー半導体の実装に用いられれば、実装工程全体の低コスト化、簡素化、高効率化が期待で

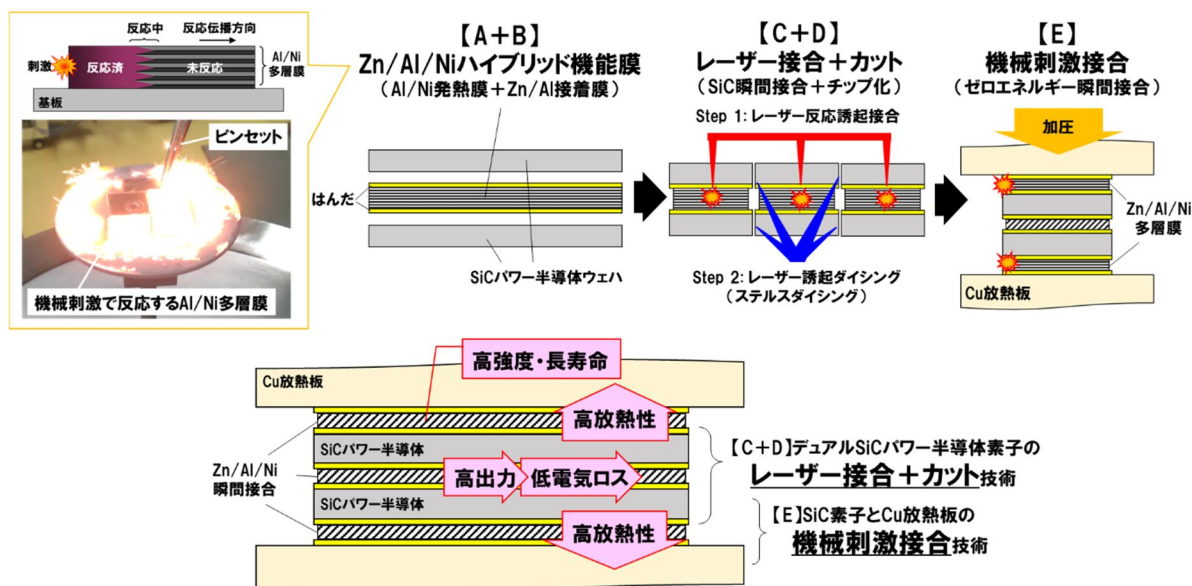


図1 本研究の取り組み概要 (Zn/Al/Ni 機能膜とレーザー技術を用いたクラック制御実装技術の開発)

きる．さらに国内某自動車メーカーが掲げる 2050 年ゼロエミッション化の取り組みとともに，本技術を国内にとどまらず海外にも展開できれば，世界規模で地球環境問題解決に大いに貢献できる．

3．研究の方法

本研究では，以下のサブテーマの実験を行うことで，上記研究目的の達成を目指した．

- 【A】延性 + 高熱伝導率 + 高強度を持つ NiAl 合金の開発
- 【B】耐熱性に優れる Zn/Al/Ni 傾斜機能多層膜の開発
- 【C】パルスレーザー多点同時照射による NiAl のクラック制御
- 【D】ステルスダイシングによるクラックフリーなデュアル SiC 素子の一括加工
- 【E】機械刺激のみでの SiC-Cu 放熱板の瞬間接合

4．研究成果

本研究では，Al/Ni 多層膜反応時に 12% 体積収縮することに基づくクラックを人為的に制御する実験技術の構築にトライした．これまでの研究により，複数点からのスパーク刺激による反応誘起により，反応後に NiAl 化合物層内に形成されるクラックの位置と向きを制御できる可能性があることを見出している．この技術を用い，ウェハ接合時に導入される NiAl 接合層のクラックを賽の目状に人為形成し，それをダイシングストリートとしてウェハ分割できれば，チップ化したデバイスの接合部は理想的にはクラックフリーが実現する．

クラック制御の自由度向上のため，新開発した 2 点同時レーザー照射機能を持つ接合システムと反応誘起させた Al/Ni 多層膜のスナップショット例を図 2 に示す．この装置は，レーザーを 2 分岐させて Al/Ni 多層膜の自己伝播発熱反応を誘起できる実験システムに，エアシリンダならびにロードセルを搭載した

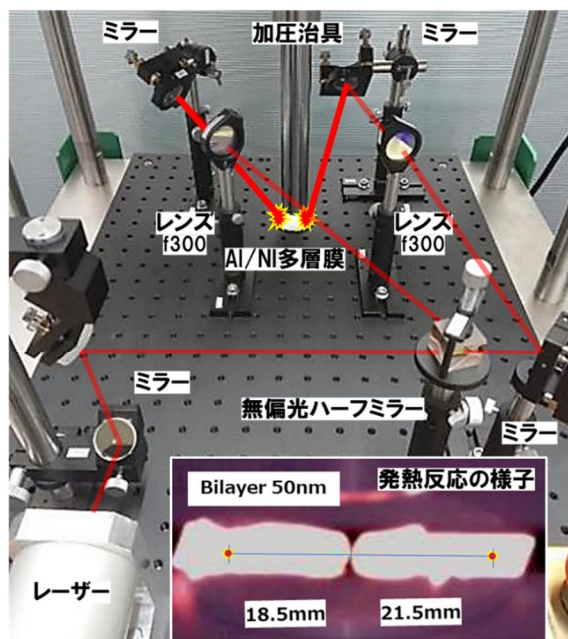


図2 2点同時レーザー照射反応誘起システムと反応時のスナップショット

加圧接合システムを組み合わせたものである．光学系には出力制御可能なレーザー（最大出力 20W，波長 1064nm，ビーム径 2mm），2 分岐するための無偏光ハーフミラー，任意の位置にレーザーを照射するためのミラー，レンズ（焦点距離 300 mm）を用いており，レーザーは CW モードとパルスモード（パルス幅 200nsec，周波数 25kHz）を選択できる．

3 源直流マグネトロンスパッタリング装置を用い，原子比 1:1，総膜厚 30 μm の Al/Ni 多層膜を成膜した．バイレイヤー厚は 15 ~ 200nm の範囲で変化させた．成膜後，Al/Ni 多層膜を成膜基板から剥離させて自立化した．多層膜表面は金属光沢を有しており，レーザー光を反射する．これを抑制するため，レーザー照射位置に黒色マーカーインクを塗布し，レーザー照射による反応誘起の確実性を確保した．2 分岐したレーザーの照射位置におよそ 5mm 角の Al/Ni 多層膜を 2 枚設置し，100% 出力で 2 点同時にレーザー照射した．反応時の多層膜表面の様子を高速カメラで撮影し，反応誘起の可否を判断した．

図 3 に示す反応誘起エネルギーとバイレイヤー厚の関係より，パルスモードでの反応誘起エネルギーは CW モードのそれより大きいことがわかる．これは，レーザーを断続的に照射するパルスモードでは熱が周囲に容易に拡散し，反応誘起に必要な熱エネルギーを多層膜内部に蓄えることが難しいためと考えられる．バイレイヤーが薄いほど反応誘起エネルギーは小さくなり，反応誘起性と反応タイミングずれには相関があることがわかる．なお，ここでは割愛するが，バイレイヤーが薄くなるとともに 2 点の反応誘起タイミングずれが小さくなった．これは，バイレイヤーが薄くなると Al と Ni の界面の数が増加するため，反応誘起性が上がることが関係している．

バイレイヤー 15nm と 100nm の積層構造を持つ Al/Ni 多層膜を用いた 2 点同時反応誘起瞬間接合でできたクラックの一例を図 4 に示す．この多層膜は，反応誘起タイミングずれが少ないバイレイヤー 15nm の部分と，単位体積当たりの反応誘起エネルギーが大きいバイレイヤー

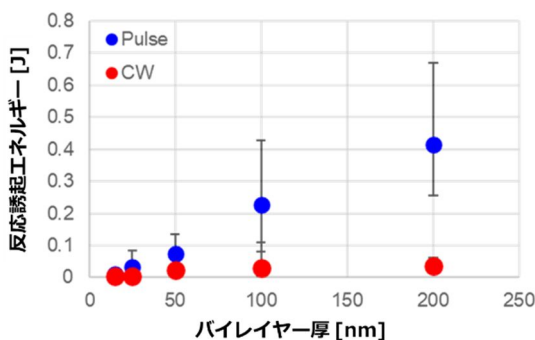


図3 反応誘起エネルギーのバイレイヤー厚依存性

100nm の膜をミックスしたものである。図より、ウエハの左右から誘起させた反応が中央付近で衝突する反応誘起～伝播の過程において形成されるクラックは3種類あることがわかる。まず、放射状に進む反応の向きと同じ向きにできるクラック、それに直行する小さなクラック、そして、2つの反応が衝突する位置にできる大きな縦クラックである。最初の2つのクラックは体積収縮しながら生じる化合物形成に伴うものであり、反応後のNiAlを高靱化できれば十分抑制できる。反応衝突位置にできる縦クラックの位置はバイレイヤー厚やレーザー照射タイミングで制御可能であり、所望の位置に人為形成できることを確認した。

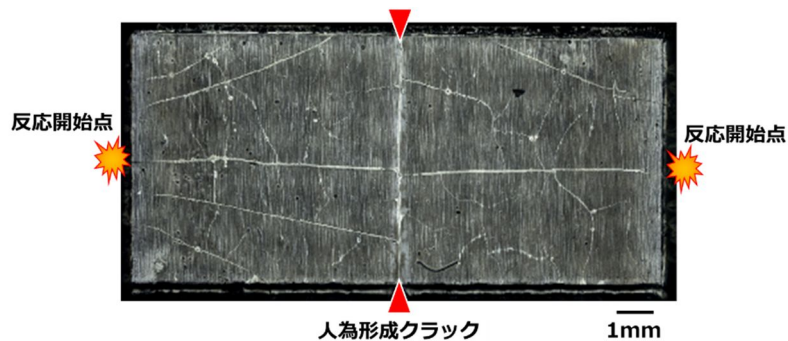


図4 2点同時反応誘起実験により人為形成したクラックの一例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9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 Daisuke YASUGI, Kenta KODAMA, Daiki GOTO, Muneyuki NAITO, and Takahiro NAMAZU	4. 巻 22
2. 論文標題 Effect of B Addition on Fracture of Reactively Alloyed NiAl Thin Film	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 実験力学	6. 最初と最後の頁 124-127
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 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 Michiko Shindo, Yuga Kumakiri, Ryosuke Terasawa, Kana Maekawa, Kenta Kodama, Takahiro Namazu	4. 巻 60
2. 論文標題 Effect of molten salt reduction on exothermic characteristics of titanium/reduced silica nanoparticles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SCCL09
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abebbe	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 Maekawa Kana, Ito Shun, Namazu Takahiro	4. 巻 59
2. 論文標題 Influence of bonded area size on cracking in reacted NiAl layer for crack-free reactive soldering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 S11L01 ~ S11L01
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ab769b	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 Kuntani Yasuhiro, Goto Daiki, Maekawa Kana, Kodama Kenta, Kanetsuki Shunsuke, Miyake Shugo, Namazu Takahiro	4. 巻 59
2. 論文標題 Mechanical shock-induced self-propagating exothermic reaction in Ti/Si multilayer nanofilms for low-power reactive bonding	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 S11L09 ~ S11L09
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ab827f	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 Shindo Michiko, Kiyohara Keita, Inoue Keita, Kodama Kenta, Namazu Takahiro	4. 巻 59
2. 論文標題 Exothermically reactive titanium?silica nanoparticles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 S11L06 ~ S11L06
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab8283	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 Kanetsuki Shunsuke, Miyake Shugo, Namazu Takahiro	4. 巻 31
2. 論文標題 Effect of Free-standing Al/Ni Exothermic Film on Thermal Resistance of Reactively Bonded Solder Joint	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 729-729
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18494/SAM.2019.2076	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 Taisei Izumi, Shugo Miyake, Shunsuke Kanetsuki, and Takahiro Namazu	4. 巻 4
2. 論文標題 Instantaneous Solder Joining Technique Using Exothermic Reaction of Al/ Ni Multilayer Powder	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Experimental Mechanics	6. 最初と最後の頁 84-89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11395/aem.4.0_84	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 後藤大輝, 訓谷保広, 前川夏菜, 山本梨乃, 金築俊介, 三宅修吾, 生津資大	4. 巻 19
2. 論文標題 Al/Ni多層膜の自己伝播発熱反応特性のバイレイヤー厚依存性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 実験力学	6. 最初と最後の頁 30-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11395/jjsem.19.122	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 前川夏菜, 金築俊介, 後藤大輝, 生津資大	4. 巻 19
2. 論文標題 Al/Ni瞬間発熱接合体の曲げ強度に及ぼす接合界面状態の影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 実験力学	6. 最初と最後の頁 38-43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11395/jjsem.19.38	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12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Michiko Shindo, Yuga Kumakiri, Ryosuke Terasawa, and Takahiro Namazu
2. 発表標題 Effect of molten salt reduction on exothermic characteristics of titanium/reduced-silica nanoparticles
3. 学会等名 33rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference, MNC2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuga Kumakiri, Michiko Shindo, and Takahiro Namazu
2. 発表標題 Shape comparison in alumina and silica porous nanoparticles
3. 学会等名 33rd International Microprocesses and Nanotechnology Conference, MNC2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 児玉健太, 門口卓矢, 後藤大輝, 訓谷保広, 前川夏菜, 生津資大
2. 発表標題 Al膜を接合層としたAl/Ni瞬間接合技術
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会2019年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前川夏菜, 金築俊介, 児玉健太, 生津資大
2. 発表標題 Al/Ni瞬間接合における発熱層とはんだ層の自立化の効果
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会2019年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前川夏菜, 金築俊介, 児玉健太, 生津資大
2. 発表標題 Al/Ni発熱多層膜とはんだ膜の自立化が瞬間接合体の機械信頼性に及ぼす影響
3. 学会等名 2020年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 児玉健太, 門口卓矢, 金築俊介, 前川夏菜, 生津資大
2. 発表標題 Al膜を接着層としたAl/Ni瞬間接合体作製の試み
3. 学会等名 2020年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本有紀子, 児玉健太, 生津資大, 土屋智由
2. 発表標題 Al/Ni 発熱多層膜を用いた真空封止技術における MEMS 振動子による真空度評価
3. 学会等名 2020年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前川夏菜, 児玉健太, 三宅修吾, 生津資大
2. 発表標題 多点レーザー反応誘起技術を用いた Al/Ni 多層膜の発熱性能定量化
3. 学会等名 2020年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 児玉健太, 前川夏菜, 生津資大
2. 発表標題 Al/Ni 瞬間接合体内部のクラックとポイド形成に及ぼす Al 接着層厚さの影響
3. 学会等名 日本機械学会第11回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kana Maekawa, Shunsuke Kanetsuki, Daiki Goto, Takahiro Namazu
2. 発表標題 Effect of Material Interface Control on Bending Strength of Al/Ni-reactively-soldered Si Joint
3. 学会等名 ISSP2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daiki Goto, Yasuhiro Kuntani, Kana Maekawa, Shunsuke Kanetsuki, Shugo Miyake, and Takahiro Namazu
2. 発表標題 B-doped Al/Ni Multilayer Film for Crack-less Reactive Bonding
3. 学会等名 MNC2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhiro Kuntani, Daiki Goto, Kana Maekawa, Kenta Kodama, Shunsuke Kanetsuki, Shugo Miyake, and Takahiro Namazu
2. 発表標題 Mechanical-shock-induced Exothermic Reaction in Ti/Si Multilayer Nanofilms for Low-power Reactive Bonding
3. 学会等名 MNC2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

生津研究室HP https://lab.kuas.ac.jp/~namazu/
--

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
研究分担者	三宅 修吾 (Miyake Shugo) (60743953)	神戸市立工業高等専門学校・その他部局等・教授 (54502)	

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
---------	---------