

持続可能社会を実現するパワー半導体実装の ゲームチェンジングテクノロジー

京都先端科学大学 工学部機械電気システム工学科

生津 資大

1. はじめに

現代社会において、石油資源枯渇化ならびに地球温暖化に向けた取り組みは産業上ならびに科学技術上の双方で不可欠である。内燃機関を持つ自動車の数はこの数年で減少の一途をたどり、代わりにエンジンとモーターを組み合わせたハイブリッド車 (HV) や電気自動車 (EV)、燃料電池車 (FCV) が増加している。これらの車には、電源 ON-OFF を高速スイッチングしてインバーターを制御し、燃費改善に貢献するパワーコントロールユニットが搭載されている。パワー素子として Si 製の IGBT (絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ) が使われているが、更なる性能向上に向け、Si より耐熱性に優れ、かつ、低電力損失が期待できる SiC 素子が研究開発されている。SiC 製インバーターは Si 製と比較して、2006 年の時点で体積 1/4、電力損失 70%減を達成し、SiC 素子自体の性能の高さは既に実証済であるが、実用には「高温動作に耐えうる接合技術が未確立」という極めて大きな課題が残っている。Si 素子の接合にははんだを使ったリフローが使われるが、SiC 素子は 300~350°C で動作するため、はんだを使う選択肢はない。加えて、リフローには数十分~数時間の比較的長いプロセスタイムが必要で、必然的に消費電力が大きくなる。省エネ・低 CO₂ 排出の観点からも、これからの EV・FCV 用の SiC パワー半導体接合技術のブレークスルーが強く求められている。

この要求に対し、本研究では「自己伝播発熱膜を用いた瞬間接合法」を提案する。本研究の目的は、“極微小刺激”で発熱反応を誘起できる発熱金属多層膜 (Al/Ni 等) と Al 接着層を用い、ボイドフリーかつクラックフリーで脆性破壊しない接合体の瞬間製造プロセスを確立することである。キーマテリアルは、“ピンセットで突く”という極単純な機械刺激だけで発熱を伴う化合物生成反応を引き起こす自己伝播発熱膜である¹⁻¹⁰⁾。この材料を用いた SiC ウェハの瞬間接合技術と多点レーザー反応誘起技術を組み合わせ、接合層内部のクラックの位置と向きを人為的に制御する実験手法を構築する。そして、SiC ウェハ内部に人為的に作製したクラックをダイシングストリートとして SiC をチップ化

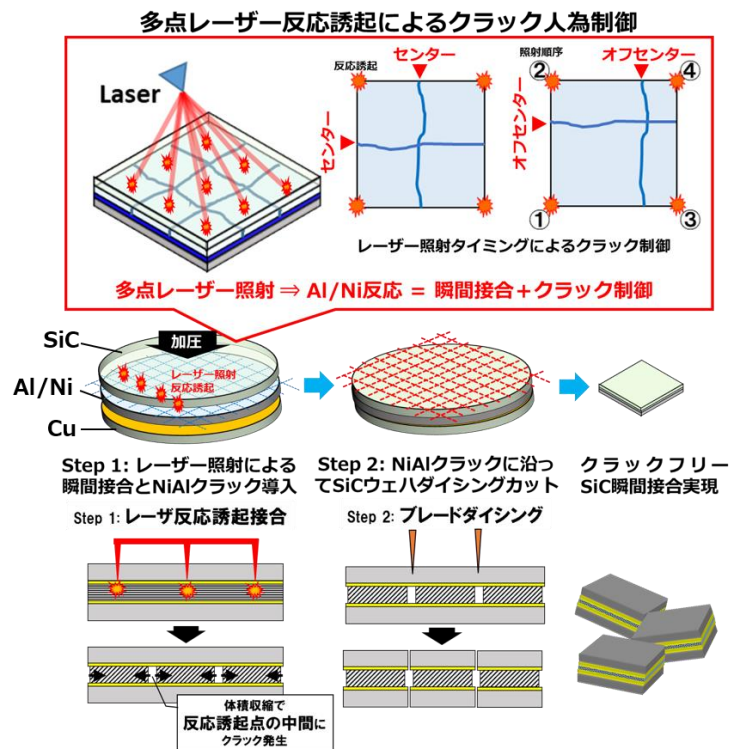


図 1. 本研究の狙い

し、完全クラックフリーな SiC チップの製造技術確立を目指す（図 1）。

2. 多源スパッタリング装置の開発と Al/Ni 多層膜成膜

本研究のキーマテリアルである Al/Ni 発熱多層膜の発熱特性を接合のために最適化するには、それぞれの元素の膜厚と積層数の正確な制御で自動成膜できる装置が必要である。加えて、熱物性計測においては校正用薄膜試料の成膜が必要である。これらの目的のため、多源スパッタリング装置を開発した。図 2 に完成した多源スパッタリング装置の外観写真を示す。本装置は主に、2 インチカソード 2 本、昇降回転機構付き基板ステージ、4 インチ基板対応基板導入部、自動メインバルブ、ロータリーポンプ、ターボ分子ポンプ、電源・制御部および制御 PC で構成されている。カソードは将来的に 4 源まで搭載可能な仕様としており、各種センサーを増設できるポートも配置してある。真空チャンバー（φ406×600mm）の排気系には 193L/min のロータリーポンプと 345L/s のターボ分子ポンプを用い、到達圧力 10^{-5} Pa まで数時間で達し、効率的な成膜実験が可能である。基板ステージは昇降回転機構

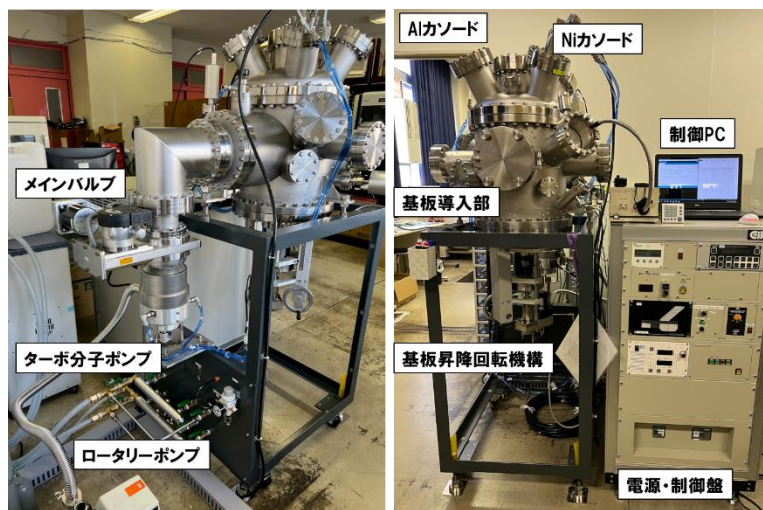


図 2. 設計開発した多源スパッタリング装置

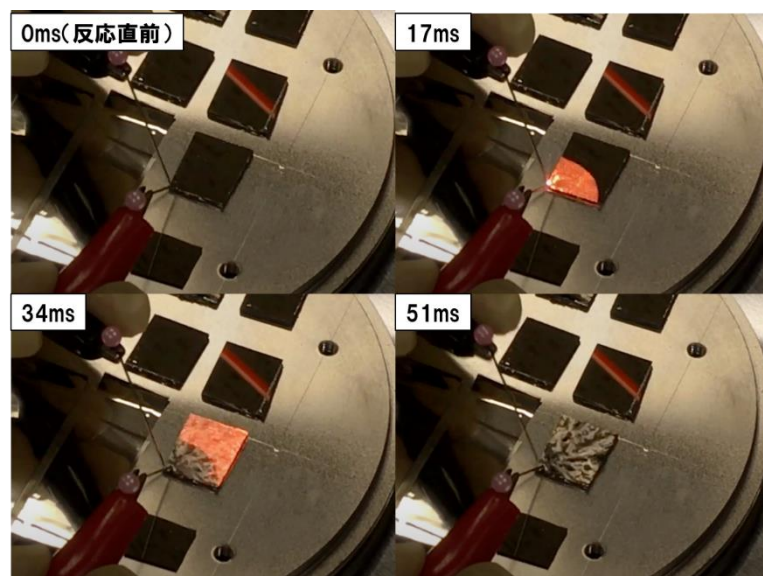


図 3. Al/Ni 多層膜の自己伝播発熱反応の様子

を備えており、Al/Ni 多層膜のバイレイヤー厚さ制御や組成傾斜多層膜の成膜が可能である。多層膜成膜の自動化においては、カソード選択と成膜時間において柔軟性の高い成膜実験を可能とするため、プログラムによる制御を採用している。マイコンボード Arduino UNO R3 とリレーシールドを用い、カソード電源および電源切替コントロールボックスを制御するプログラムを Arduino IDE で開発した。Ar ガス流量 5sccm、成膜圧力 0.1Pa、DC 電力 50W における Al および Ni 膜の成膜レートは約 5nm/min であり、4 インチ基板上での膜厚分布は中心 2 インチ付近で 5%以内と、実験上十分満足な精度で膜厚を制御出来ることが確認された。

図 3 に、作製した Al/Ni 多層膜の反応誘起実験のスナップショットの代表例を示す。新たに開発したスパッタ装置で成膜した t30nmAl/t20nmNi バイレイヤー 200 層積層（総膜厚 10 μ m）の Al/Ni 多層膜に対し、電気スパークで反応させた瞬間を撮影したものである。撮影機器のフ

フレームレートは 1/60fps (1 コマあたり 17ms) である。これより、電気スパークを印加した点から放射状に反応が伝播している様子を明瞭に確認できる。その速度はおおよそ 10m/s 程度であり、過去に製膜した Al/Ni 多層膜と概ね同等の反応伝播速度であることを確認した。本プロジェクトにより設計開発した多源スパッタリング装置により、発熱反応と高速自己伝播を示す Al/Ni 発熱多層膜の成膜が可能であることを実証した。なお、図 4 に示すのは機械刺激をトリガとして発熱反応を誘起した様子の写真である。ピンセットで突くだけで発熱反応を誘起できる多層膜を形成できることを確認した⁶⁾。



図 4. 機械刺激で発熱反応する様子

3. レーザー反応誘起装置を用いた Al/Ni 反応誘起実験

図 5 に示す 2 点同時レーザー反応誘起装置は、主として反応誘起用のレーザー光源、光路分岐用のレンズ・ミラー等の光学素子、サンプルステージ、接合時のチップ加圧用のエアシリンダ、荷重計測用のロードセルから構成されている。レーザーは SiC 素子の透過を狙い、波長 1064nm のものを選定している。発光モードは CW レーザーとパルスレーザーの 2 種類を備えている。この装置に加えて高速度カメラを試験片周辺に設置し、反応誘起から伝播の様子を 150,000 枚/秒のフレームレートで捉えることができるシステムである^{8,9)}。

SiC チップを透過させた状態で Al/Ni 多層膜を反応誘起させ、はんだ接着させる実験を試みた。図 6 に、SiC チップを介した Al/Ni 多層膜の反応誘起実験の様子を示す。Ni メッキを施した Cu 基板の上に SnAg はんだ、Al/Ni 多層膜、SnAg はんだ、SiC チップの順に重ね、上部から機械的に 1MPa 加圧した状態で、SiC チップを介してレーザーを Al/Ni 多層膜表面に照射した。このときのレーザーの照射条件は、波長 = 1064nm、ビーム径 = 2mm、出力 = 20W、モード = CW

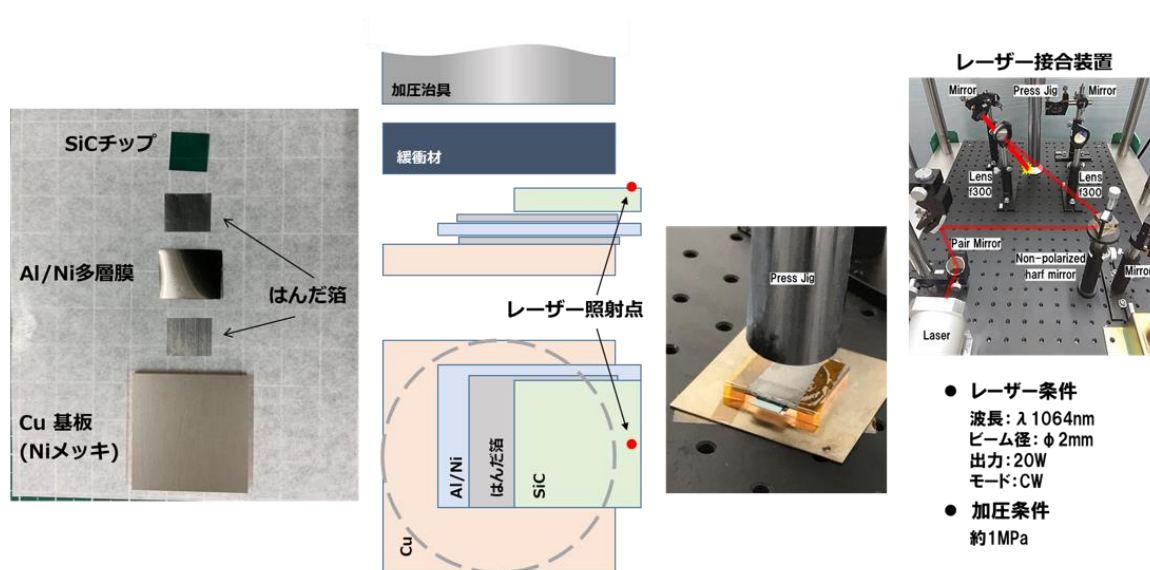


図 5. 2 点同時レーザー反応誘起装置の概略

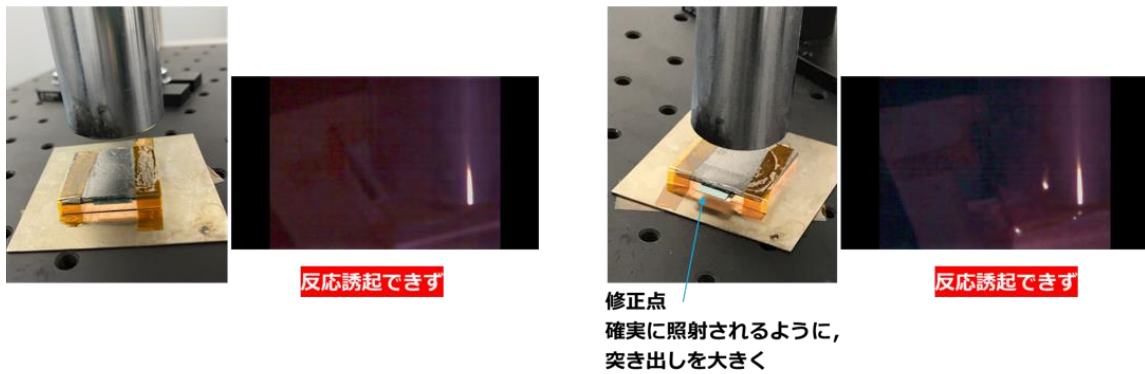


図 6. SiC チップを介した Al/Ni 多層膜の反応誘起実験の様子

モードである。結果、Al/Ni 多層膜の反応誘起は確認できなかった。SiC チップを介して照射されたレーザーが Al/Ni 多層膜のオーバーハンクしている部分に物理的に届いていなかった可能性を考え、オーバーハンク長を大きくして再度実験を試みた。しかし、1 回目と同様に反応誘起させることができなかった。レーザー波長からすると SiC チップを透過すると考えられる。反応が起きなかった理由として、レーザーの照射焦点が Al/Ni 多層膜表面から上下どちらかにずれが生じていたこと、SiC チップ内部での光の散乱が起こったために Al/Ni 多層膜を反応誘起できるだけのエネルギーが供給されなかったこと、等が考えられる。これらを技術的に解決できれば、当初の狙い通り、SiC ウェハを介した Al/Ni 多層膜の反応誘起と瞬間接合が可能になる。

4. SiC チップの接合実験

Al/Ni 多層膜を使った瞬間接合手法の SiC パワー半導体素子への適用性を確認するため、Al/Ni 多層膜を用いて SiC チップと Cu 基板との瞬間接合を試みた。今回、接着層として SnAg はんだと Al 箔の 2 種類を用いた。ここで用いた SiC チップは厚さ=300 μm の 4 インチ 4H-SiC ウェハであり、これを 2mm \times 2mm にダイシングカットしたものである。Cu 基板の表面には Ni メッキを施しており、サイズは 5mm \times 5mm である。Al/Ni 多層膜は原子比=1:1、バイレイヤー厚=100nm、総膜厚=40 μm である。エンタルピーを考慮してこの仕様とした。

まず、Cu 基板の上に SnAg はんだ箔、Al/Ni 多層膜、SnAg はんだ箔、SiC チップの順に重ね、その上から 3MPa、10MPa、30MPa の機械的負荷を与えた。この状態でオーバーハン

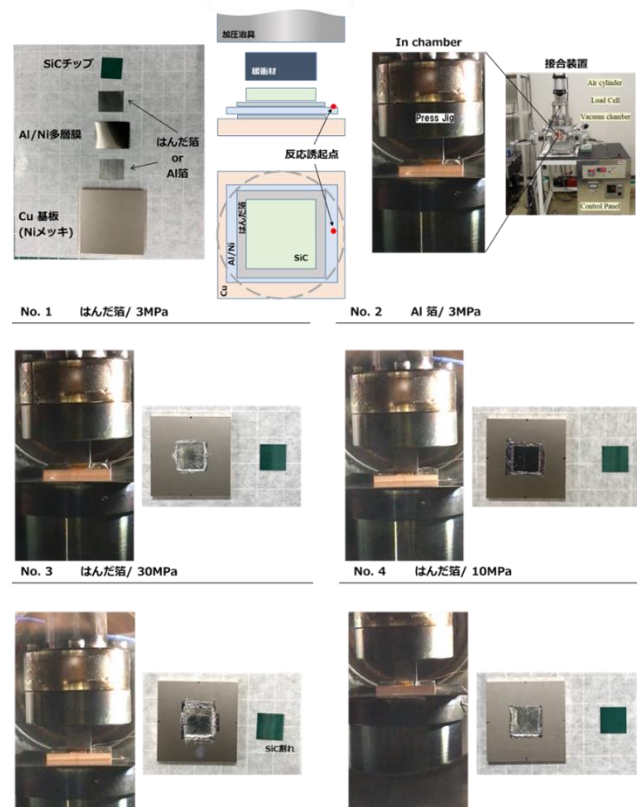


図 7. SiC チップ接合実験の結果例

グさせた Al/Ni 多層膜に直接刺激を与え、反応誘起させた。図 7 に示すように、いずれの加圧条件でも、SiC チップのみが剥離する結果となった。30MPa 加圧下で接合実験した場合、SiC チップに割れが生じており、機械的負荷への耐久性に懸念が残る結果となった。SiC チップ直下のはんだ以下はいずれの条件でも接合できたという実験事実は、Al/Ni 多層膜の発熱性能自体は接着層のはんだを溶融させるのに十分であったことを示している。つまり、SnAg はんだの SiC チップ表面への濡れ性を改善できれば、この種の問題を解決でき、Al/Ni 多層膜の発熱反応で SiC チップと Cu 基板を瞬間接合できると言える。

上記問題解決のため、まず、SiC チップ裏面に Au 膜を製膜した。製膜は DC スパッタリング法で行い、厚み 100nm の純 Au 膜を製膜した。結果を図 8 に示す。今回は代表条件として 10MPa 加圧を選択し、瞬間接合を試みた。しかし、図に示すように、Au 膜を中間層としても SnAg はんだと SiC チップ間の密着性を改善することはできなかった。最適中間層を見つけるべく、文献調査などを行った結果、極微量の Ti と Ag を SiC 表面に塗布することではんだとの濡れ性が改善されることを見出した。これを受け、Ti と Ag をそれぞれ 0.2 μ m、3 μ m ずつ SiC チップ裏面にスパッタ製膜し、3MPa 加圧下の条件で瞬間接合を試みた。

図 9 に示すように、SiC チップとはんだ箔との間で剥離は生じず、瞬間接合に成功した。超音波画像 (SAT 像) からわかるように、接合層内部には数本のクラックが見られた。これは、Al/Ni 多層膜が反応後に NiAl 化合物になり、結晶構造変化が生じて体積収縮したことに起因

No. 1 はんだ箔/ 10MPa

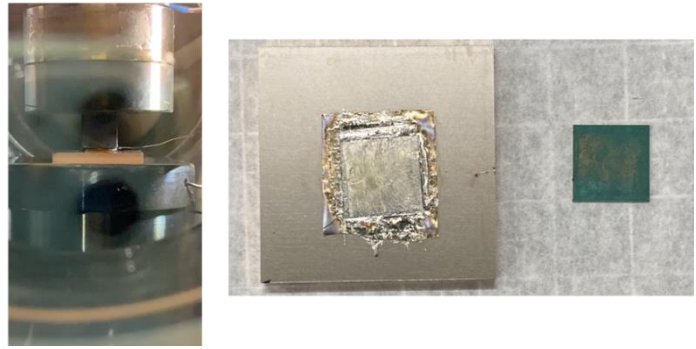
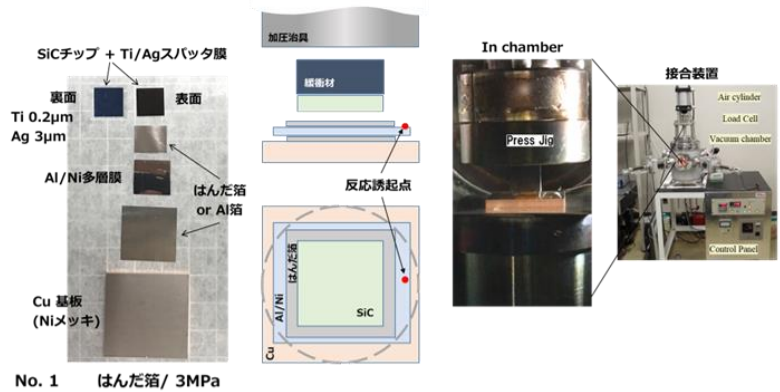
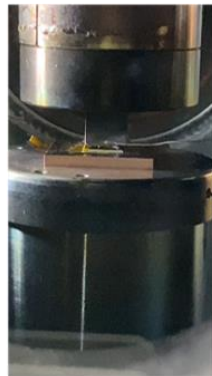


図 8. Au 被覆した SiC チップ接合実験の結果例



No. 1 はんだ箔/ 3MPa



No. 2 Al 箔/ 3MPa

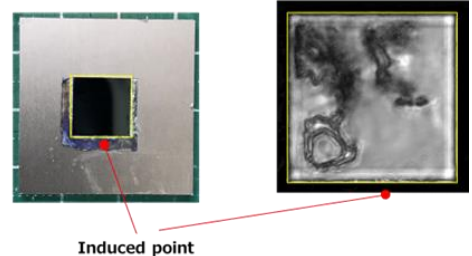
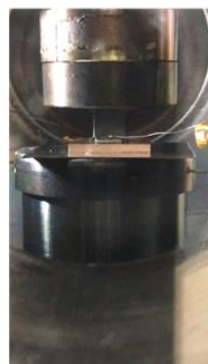
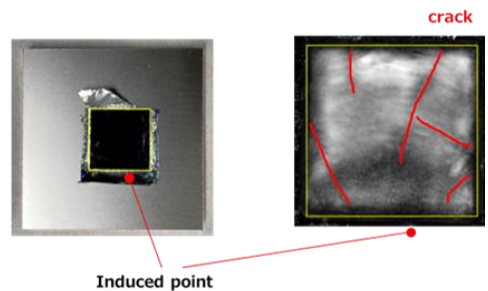
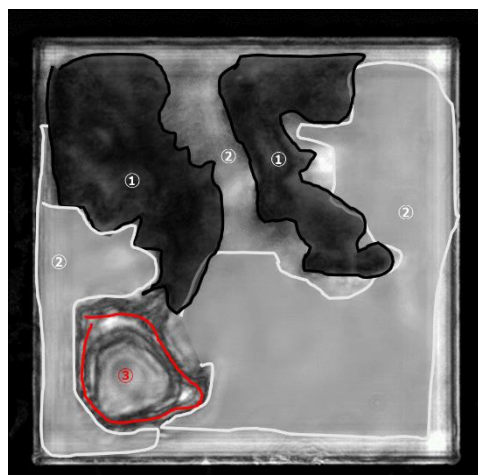


図 9. Ti/Ag 被覆した SiC チップ接合実験の結果例

している。接合は加圧下で行うため、反応に伴って体積収縮する Al/Ni が、機械的に拘束されて自由に収縮できなかったためにクラックが残存したのである。いずれにせよ、Al/Ni 多層膜の瞬間発熱反応で上下の SnAg はんだを溶融させ、瞬時に SiC チップと Cu 基板を接合することに成功した。



接合状態の詳細情報	
①:	完全接合領域
②:	接合しているが接合密着度が低い領域
③:	界面が未接合領域

判断の仕方(波形情報を基に)	
①	の完全接合波形を基準とし、
②	は、位相は同じだが振幅強度が低い。
③	は、位相反転している

図 10. Al/Ni 瞬間接合した SiC チップの SAT 観察例

SnAg はんだの共晶温度は 220°C であり、SiC パワー半導体素子のダイボンディング接着層としては不向きである。接着層に求められる特性として、比較的高融点であること (SiC チップの動作温度 = 300°C 付近以上であること)、Al/Ni の体積収縮を吸収できるだけの柔軟性があること、半導体プロセスで簡単に準備できること、等がある。今回は、候補の一つであるスパッタ Al 膜を選択し、Al/Ni 多層膜で瞬間 SiC 接合するための新たな接着層としての可能性を検証した。先の図 9 に示すように、SnAg はんだと同条件で 3MPa の機械加圧下で瞬間接合を試みた結果、見事に SiC チップと Cu 基板の Al 接合に成功した。しかし、SAT 像は白黒コントラストが大きいことを示しており、これは接合が完全には完了していない可能性を示唆している。超音波は径情報をもとに詳細に確認すると、図 10 に示すように、3 領域に分割することができた。SAT 像の黒色領域 (①領域) は完全接合領域であり、Al 層が SiC チップと Cu 基板の接着層として機能していることを確認できる。淡いグレー領域 (②領域) は①領域と同位相であり、接合していることを示しているが、波形信号の強度が低く、接合度合いが低いことを示している。つまり、接着自体はできているが、界面にボイドやマイクロクラック等が存在している可能性が高く、残念ながら完全な接合領域とは言い難い。③領域は①・②の領域と位相が反転しており、接合層のどこかのレイヤーに空隙が存在している、つまり、いずれかの界面が未接合であることを示している。

今回の結果より、低融点の SnAg はんだでは SiC チップと Cu 基板を Al/Ni 多層膜の瞬間発熱で完全に接合させることができた。しかし、SiC チップの実用を考慮して選択した Al 接着層の場合は部分的に接合に成功したものの、脆弱な接合部分や完全に未接合な部分が見られた。熱の収支をデザインして Al/Ni の発熱を高効率に Al 接着層に与えることや、Al 接着層自体の酸化を抑制するなどの技術的改善がなされれば、本研究で提案した Al/Ni 多層膜の瞬間接合技術は SiC パワー半導体チップの瞬間接合に有用であることを確認できた。

5. まとめ

本研究では、Al/Ni 多層膜を用いた瞬間接合技術がパワー半導体のダイボンディングに有効であることを示すことができた。今後は、SiC パワー半導体チップを使った Al/Ni 瞬間ダイボンディングと多点同時反応誘起レーザー照射技術を使ったクラック制御技術の確立に挑戦する。Al/Ni 多層膜が NiAl 化合物に反応変化する際の 12% の体積収縮に起因して生じるクラック

クをダイシングストリート上に巧みに人為形成し、ダイシング後の SiC チップ下の NiAl 層のクラックをゼロにする“クラックフリーSiC ダイボンディング”を実証する。それに向けては、クラックだけでなくポイドフリー化も重要であり、NiAl を高靱化するための添加物の導入など、材料面での最適化も行う予定である。

既存の半導体ボンディング技術を当該技術に置換、それを世界規模で実現できれば、省エネ・CO₂削減はもちろん、プロセスの高効率化やゼロエミッションも進み、半導体組み立て工程だけでなく地球温暖化の抑制にも貢献できる。本研究では、その可能性の一端を示すことができた。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人 天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) T. Namazu, K. Ohtani, S. Inoue, and S. Miyake, “Influences of Exothermic Reactive Layer and Metal Interlayer on Fracture Behavior of Reactively-Bonded Solder Joints”, Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, 137(3), 031011, 2015.
- 2) S. Kanetsuki, S. Miyake, K. Kuwahara, and T. Namazu, “Influence of Bonding Pressure on Thermal Resistance in Reactively-bonded Solder Joints”, Japanese Journal of Applied Physics, 55(6S1), 06GP17, 2016.
- 3) T. Namazu, S. Ito, S. Kanetsuki, and S. Miyake, “Size Effect in Self-propagating Exothermic Reaction of Al/Ni Multilayer Block on a Si wafer”, Japanese Journal of Applied Physics, 56(6S1), 06GN11, 2017.
- 4) S. Kanetsuki, K. Kuwahara, S. Egawa, S. Miyake, and T. Namazu, “Effect of Thickening Outermost Layers in Al/Ni Multilayer Film on Thermal Resistance of Reactively-bonded Solder Joints”, Japanese Journal of Applied Physics, 56(6S1), 06GN16, 2017.
- 5) S. Kanetsuki, S. Miyake, and T. Namazu, “Effect of free-standing Al/Ni exothermic film on thermal resistance of reactively-bonded solder joint”, Sensors and Materials, 31(3), 729-741, 2019.
- 6) 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, “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”, 実験力学, 19(2), 30-34, 2019.
- 7) 前川夏菜, 金築俊介, 後藤大輝, 生津資大, “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”, 実験力学, 19(1), 38-43, 2019.
- 8) K. Maekawa, S. Ito and T. Namazu, “Influence of bonded area size on cracking in reacted NiAl layer for crack-free reactive soldering”, Japanese Journal of Applied Physics, 59, SIIL01, 2020.
- 9) K. Maekawa, K. Kodama, S. Miyake, and T. Namazu, “Laser-induced multiple points ignition test in Al/Ni exothermic reactive film for crack propagation control”, Japanese Journal of Applied Physics 60, SCCL15, 2021.
- 10) D. Yasugi, K. Kodama, D. Goto, M. Naito, and T. Namazu, “Effect of B Addition on Fracture of Reactively Alloyed NiAl Thin Film”, Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, 22(2), 124-127, 2022.