

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 11 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05304

研究課題名(和文) 太陽電池コンタクター長寿命化接続技術の基盤研究

研究課題名(英文) Improvement on long term reliability of interconnection of solar cell module

研究代表者

巽 宏平 (Tatsumi, Kohei)

早稲田大学・理工学術院(情報生産システム研究科・センター)・教授

研究者番号：80373710

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：太陽電池の寿命支配主要因は、インタコネクションの劣化である。Niマイクロメッキ接合(NMPB)は従来の半田接合を置き換えるもので格段に信頼性が優れている。NMPBをインターコネクション接合に適用し、太陽電池モジュールの長寿命化ならびに平均変換効率劣化抑制効果を評価した。最適化NMPB法を用いてモジュールを作成し信頼性加速試験を実施した。熱サイクル試験(-45～150、1000サイクル)、高温高湿試験(85、85%、1000時間)で、従来法は、出力低下がいずれにおいても、顕著であるのに対して、NMPB法ではほとんど見られなかった。大幅な長期信頼性向上、発電コスト低減の可能性が明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

NMPBは広範囲に使用されている半田接続を置き換えることのできる高信頼接続技術であることが実証され、またその制御要因である微細組織との関連を明確にした。太陽電池モジュールの寿命は従来20年程度とされてきたが、40年使用できる可能性を示した。さらに使用中の配線抵抗劣化を抑制できることから、使用全期間における平均的な変換効率の大幅な改善につながり、結果として太陽電池による発電コストの低減を可能とするものであり、脱炭素社会実現に少なからず貢献できる技術といえる。

研究成果の概要(英文)：The dominant factor in the life of a solar cell is the deterioration of interconnection. The Nickel micro plating bonding (NMPB) exhibits the high reliability of the device interconnection. The NMPB was applied to the interconnection of the solar cell modules to improve the life and conversion efficiency. In the thermal cycle (-45 to 150, 1000cycles) and damp heat(85, 85%, 1000hr.) tests, the degradation of the output power for conventional solder joints was remarkable, while that for NMPB was substantially suppressed. It demonstrated the significant improvement of long term reliability of NMPB interconnection to reduce the power generation cost by solar power modules.

研究分野：エレクトロニクス実装技術

キーワード：太陽電池 インターコネクター NMPB ニッケルメッキ 長寿命化 ソーラーセル

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

エネルギーデバイスの長寿命化は、今後のエネルギーコストの低減のために必須の課題である。一般に、太陽電池の期待寿命はパネルが20～30年、パワーコンディショナーは10年から15年と言われている。太陽電池は、再生可能エネルギーの中でも機械的駆動部がなく、メンテナンス費用が比較的少なく、騒音もないことから、有望視されてきたが、発電コストの低減が未だに十分でなく、補助金制度の有無により、普及が大きく左右されている。太陽電池の発電コストは、設備費用、設置費用ならびに償却年数、メンテナンスコストなどから算出されるが、従来の発電設備に対して、太陽電池は、設備寿命は20年程度として、計算されるために、償却コスト（設備費用）分の比率が大きく、相対的にコスト高となっている要因である。セルの変換効率が年々進歩している段階では、技術の進歩により、設備自体が陳腐化し、更新すべき年限が短くなることも考えられるが、Si系の太陽電池の効率は、今後大幅な改善が期待できない段階である。一方、設備の寿命については、10年以上経過した設備の故障の調査例をみても、セル自体の効率の低下などの問題はほとんどなく、原因は腐食とインターコネクター不良がそれぞれ40%強であり、寿命を支配する主要因と言える[1]。コスト高の要因はあるものの、支持体の腐食など対策が考えられるが、インターコネクター部の長寿命化については、有望な提案がないのが現状である。太陽電池の償却年数を40年確保できれば、従来技術による発電コストに匹敵する発電コストの低減が可能となる。

2. 研究の目的

インターコネクターの鉛ハンダの熱膨張率（CTE）は24ppm/K、セルのSiは2.6ppm/Kで、熱膨張差が大きく熱疲労による劣化が原因の一つである。また長期の使用によるハンダの腐食による電気抵抗の増加とその結果ヒートスポット化し、周辺の樹脂劣化が見られる場合が多い。またハンダの熔融による接合のため、周辺部との熱膨張差により、接合後の残留ひずみが残ることも懸念された。NiはCTEが13ppm/Kとハンダの1/2程度であり、高強度で、耐腐食性も優れており、マイクロメッキ接合は常温近傍で接合可能[2, 3, 4]なことから、周辺との熱ひずみが少ないことも期待できる。ここでは、Niマイクロメッキ接合（NMPB）の素過程（結晶成長と接合界面形成）について明らかにすること、さらには長期信頼性に関わる、インターコネクターへの適用可能性を検証することを目的とした。

3. 研究の方法

Niマイクロメッキ接合（NMPB）は図1に示すように、Cuリードの接合部側をテーパ状に加工し、間隙を両被接合面よりメッキを成長させ、会合接合するものである（US特許15/094,759; 2016/11/04）。柱状晶を呈する接合で、成長方向の方位差が少ない場合には、ボイドなどの欠陥も少なく、高強度の界面を形成できることが判明している。接合温度は50～80℃（メッキ浴温度）であり、Cu/SiCの接合部の間隙の角度とメッキ成長速度、温度、電流密度添加剤成分により、接合部の結晶組織が異なる。図1のように、<110>方位に成長し、会合する場合に（10°以下の傾角成分を有するねじれ粒界）、欠陥がなく、破壊試験においても、界面破断がなく、母材で破断することが判明している。ここでは特に熱応力による疲労寿命と結晶方位組織関係について検討した。疲労試験には、共振式疲労試験機（図2 日本テクノプラス社製）を用いる。試験サンプルは図3に示すように、銅板にNMPB膜を形成したものと、ハンダ層を形成したものを作成し、比較評価した。また結晶方位解析には、日立SU5000 SEM装置ならびにオックスフォードインスツルメンツ製EBSD装置を使用する。

最終的には最適な界面形成条件を強度、疲労特性、メッキ成長速度（生産性）の視点から検討し、太陽電池インターコネクターへの適用を目的として評価を実施する。さらには、実際の熱疲労に準じて、エスベック製の TCT 試験装置を使用し、125°C/-40°Cの加速試験を実施する。

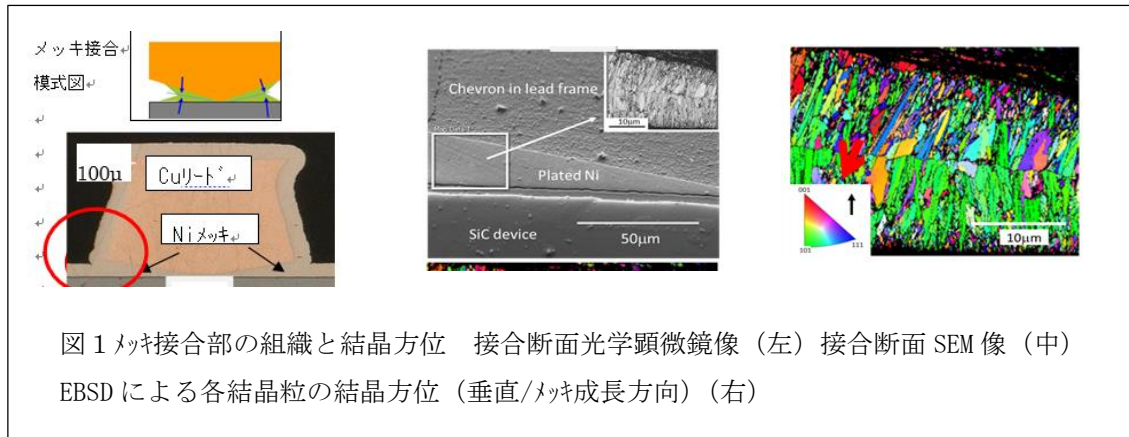


図1 メッキ接合部の組織と結晶方位 接合断面光学顕微鏡像（左）接合断面 SEM 像（中）EBSD による各結晶粒の結晶方位（垂直/メッキ成長方向）（右）

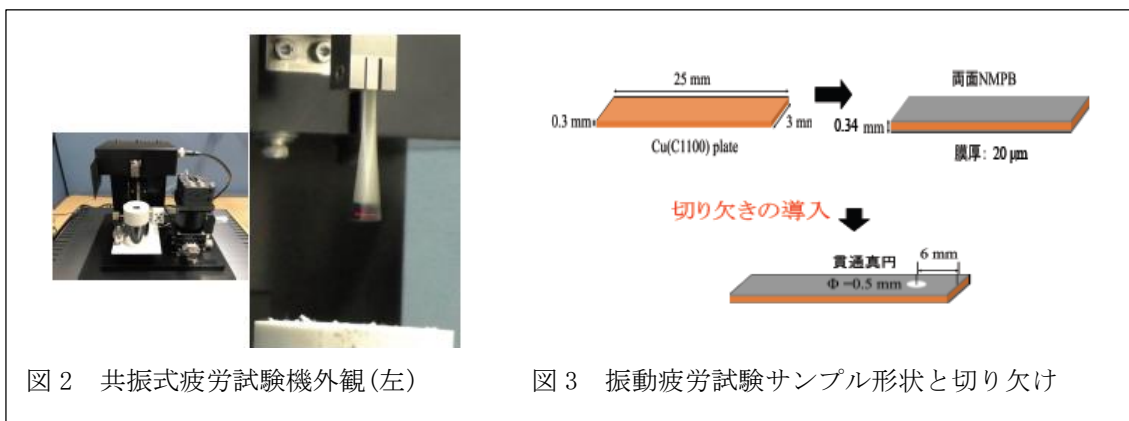


図2 共振式疲労試験機外観(左)

図3 振動疲労試験サンプル形状と切り欠け

4. 研究成果

(1) 疲労試験結果：

図4に共振式疲労試験機を用いた疲労強度試験結果を示す。常温と高温（はんだは150°C、NMPBは250°C）における振幅と破断開始サイクル数を示した。最大のサイクル数を10⁷とし、その振幅を疲労特性として比較した。いずれの場合において、NMPB法ははんだ接合に対してすぐれた疲労特性を有することが明らかになった。

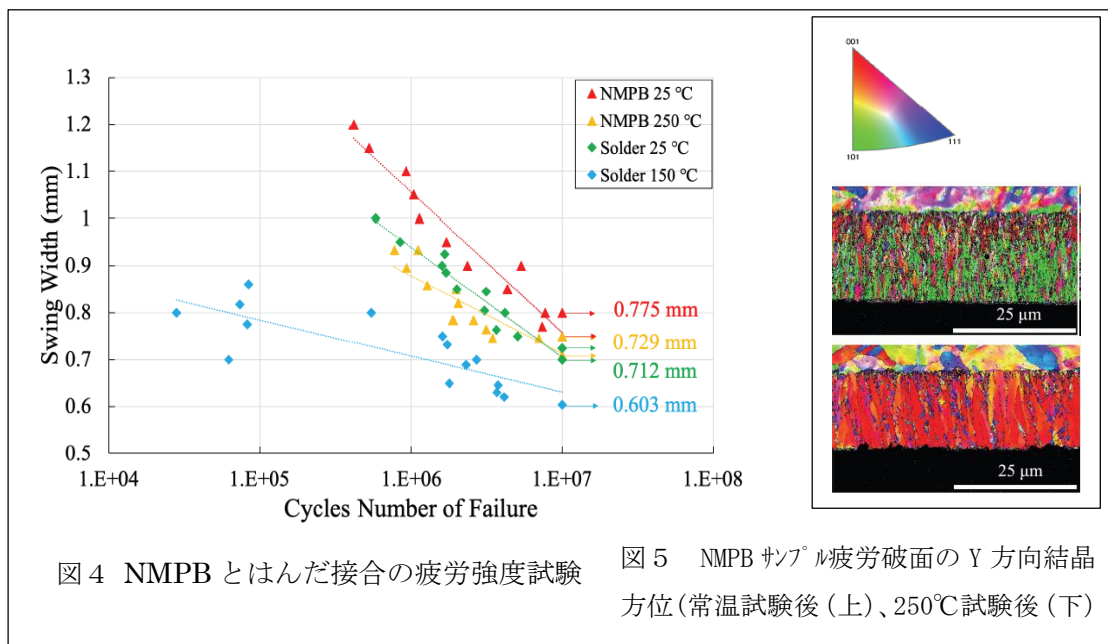


図4 NMPB とはんだ接合の疲労強度試験

図5 NMPB サンプル疲労破面の Y 方向結晶方位(常温試験後(上)、250°C試験後(下))

NMPB 結晶方位については、図5に示すとおり、めっき形成後は成長方向に細粒柱状晶を呈しており、 $\langle 110 \rangle$ $\langle 100 \rangle$ 方位が優先的に成長しており、250℃での試験中には、再結晶がすすむものの、柱状晶を維持し、 $\langle 110 \rangle$ 方位が優先方位と変化している。

(2) インターコネクタの熱サイクル試験：

太陽電池のインターコネクタは、銅リボンまたは銅ワイヤが銀電極に接続されている。ここではベアの太陽電池セル (52 x 26mm) の電極に 0.3mmΦの銅ワイヤを NMPB 法と従来のはんだ接続をおこなったものを熱サイクル (TC) 試験サンプル (図6) として作成し出力特性の低下について評価した。熱サイクル試験(-45~150℃、1000サイクル)において、従来法によるセルは、出力低下が数十%以上と顕著であったのに対して、NMPB 法では低下はほとんど見られなかった (図7)。

(3) 高温高湿試験：

熱サイクル試験と同様のサンプルについて高温高湿試験(85℃、85%、1000時間)を実施した。

従来のはんだ接続においては、出力低下が顕著であったが、NMPB 法では、劣化がほとんど見られなかった (図8)。

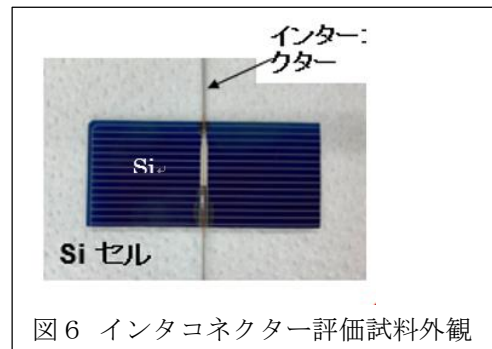


図6 インタコネクタ評価試料外観

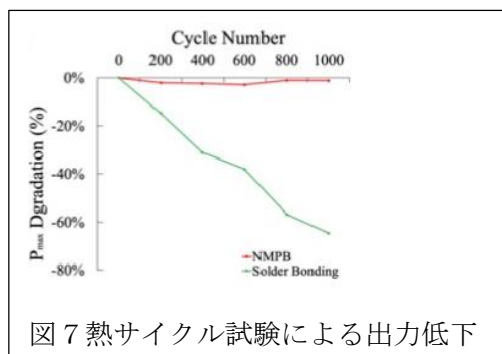


図7 熱サイクル試験による出力低下

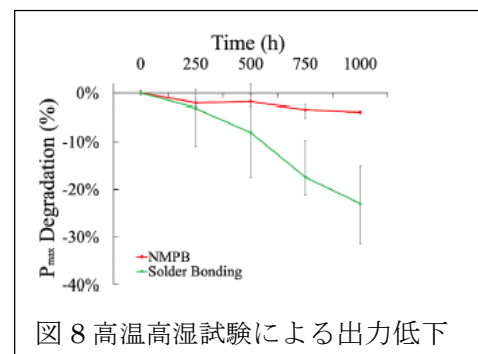


図8 高温高湿試験による出力低下

以上より、太陽電池モジュールの寿命を支配するインターコネクタの疲労、腐食等による劣化においては、新たな NMPB 法を用いた銅ワイヤ (リード) の接続により、大幅な長期信頼性向上、すなわち設備の長寿命化、発電コスト低減の可能性が明らかとなった。

参考文献

[1] 土井卓也他：エネルギーデバイスの信頼性入門、2012年12月、日刊工業新聞社、
 [2] Kohei Tatsumi, Noriyuki Kato, “New High-Temperature-resistant Packaging for SiC Power Devices Using Connectins Formed by Nickel Electroplating” Proceedings of ICEP, TC3-3, p269-273, 2013
 [3] Kohei Tatsumi; ELECTRODE CONNECTION STRUCTURE AND ELECTRODE CONNECTION METHOD 米国特許 US 15/094, 759/
 [4] 巽宏平;電極接続方法および電極接続構造、特願 2013-212166
 [5] 巽宏平、飯塚智徳;応用物理、研究紹介、Ni メッキによる高生産性パワーデバイス接合技術 (2017年2月号) p 112-116
 [6] Xinguang Yu, Zhi Fu, Isamu Morisako Isamu, Keiko Koshiba Keiko, Tomonori Iizuka Tomonori and Kohei Tatsumi, Improvement in the reliability of crystalline silicon solar cell interconnection by using Nickel Micro-Plating Bonding (NMPB) technology, Japanese Journal of Applied Physics 62, (2023) 012001p1-6

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 1件）

1. 著者名 Xinguang Yu, Zhi Fu, Isamu Morisako Isamu, Keiko Koshiba Keiko, Tomonori Iizuka Tomonori and Kohei Tatsumi	4. 巻 62
2. 論文標題 Improvement in the reliability of crystalline silicon solar cell interconnection by using Nickel Micro-Plating Bonding (NMPB) technology	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 012001 p 1-6
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 于 昕光、堂免凌太、森迫勇、小柴佳子、飯塚智徳、巽宏平
2. 発表標題 共振式疲労試験機を用いたNiマイクロメッキ接合の長期信頼性
3. 学会等名 日本金属学会春季講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中川将嘉、小野寺巧、和田佳子、飯塚智徳、巽宏平
2. 発表標題 高耐熱パワーデバイス用Niマイクロメッキ接合における電流密度の接合強度に与える影響
3. 学会等名 日本金属学会秋季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野寺巧、中川将嘉、和田佳子、飯塚智徳、巽宏平
2. 発表標題 Niマイクロメッキ接合における接合部の高温信頼性
3. 学会等名 日本金属学会秋季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Tatsumi, Isamu Morisako, Keiko Wada, Minoru Fukuomori, Tomonori Iizuka, Nobuaki Sato, Koji Shimizu, Kazutoshi Ueda, Masayuki Hikita, Rikiya Kamimura, Naoki Kawanabe, Kazuhiko Sugiura, Kazuhiro Tsuruta, Keiji Toda
2. 発表標題 High temperature resistant packaging technology for SiC power module by using Ni micro-plating bonding
3. 学会等名 69th ECTC2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 巽 宏平
2. 発表標題 Niを接続材料とする新たな高温耐熱実装技術
3. 学会等名 スマートプロセス学会エレクトロニクス生産科学部会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 于 昕光, 符 智, 森迫 勇, 小柴 佳子, 飯塚 智徳, 巽 宏平
2. 発表標題 Niマイクロメッキ接合技術を用いた結晶シリコン太陽電池インターコネクションの信頼性の向上
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 太陽電池モジュール及びその製造方法	発明者 巽宏平	権利者 早稲田大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-032159	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 電極接続方法および、電極接続構造	発明者 巽宏平	権利者 早稲田大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-055343	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究協力者	于 昕光 (Yu Xinguang)		
研究協力者	符 智 (Fu Zhi)		
研究協力者	森迫 勇 (Morisako Isamu)		
研究協力者	小柴 佳子 (Koshiba Keiko)		
研究協力者	飯塚 智徳 (Iizuka Tomonori)		

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