

(技術資料)

Si-IGBT向け高強度アルミニウム合金電極材料

Aluminum-Alloy Interconnection Material with Higher Mechanical Strength for Si-IGBT Devices



後藤裕史*1
Hiroshi GOTO



寺前裕美*1
Yumi TERAMAE



坂本尚敏*1 (博士(工学))
Dr. Hisatoshi SAKAMOTO



奥野博行*2
Hiroyuki OKUNO



金丸守賀*2 (理博)
Dr. rer. nat. Moriyoshi KANAMARU

The IGBT is being used for electric power control that needs high current and high frequency switching, and the demand for it has been continuously expanding. We have developed an aluminum-alloy thin film for use as the Si-IGBT emitter electrode, which provides high thermal stability. We expect that using the aluminum alloy film, which we have named "SA-MT," will contribute to the improvement of reliability in next-generation power-semiconductor devices.

まえがき = パワー半導体は身近な生活家電や自動車のほか、産業機械の制御や発電・送電などの電力変換の分野に広く用いられている。なかでも絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (Insulated Gate Bipolar Transistor, 以下IGBTという) は高容量かつ高速スイッチングを必要とする電力制御の用途に用いられ、急速に需要が拡大している。

複数のパワー半導体素子をつ一つのパッケージに収めたパワー半導体モジュールは近年、高容量化と小型化が加速してパワー密度が増加しており¹⁾、ジュール熱による熱膨張の問題が顕在化している。このため、部材の熱膨張率差から生じる応力に起因した素子破壊が深刻化すると考えられている。

パワー半導体素子の実装には、絶縁性のセラミックスや銅板、樹脂のほか、冷却のためのヒートシンクなど、様々な部材が用いられている。パワー半導体素子は、通電時のジュール発熱と、電流遮断時の熱拡散による冷却を繰り返すため、それぞれの部材界面には熱膨張率差による応力が繰り返し加わる。この動作時と待機時の温度差が大きくなると部材界面に加わる応力差が大きくなり、信頼性の低下を引き起こす。そこで、パワー半導体モジュールの信頼性は、実動作や環境を模擬したパワーサイクル試験あるいはサーマルサイクル試験によって検証されている。例えばサーマルサイクル試験では、これまで-45~125℃の耐久性が求められているが、今後は-75~175℃の耐久性が要求されるようになった²⁾。

そこで当社は、高信頼性が要求されるSi-IGBTのエミッタ電極向けに高強度Al合金電極材料 (Super Aluminum-Mechanical Tough, 以下SA-MTという) を開発した。エミッタ電極として求められる特性は満たしたうえで、従来材料の課題であった素子作成のプロセス課題を改善

できる。同時に高い材料強度が得られることが特徴で、熱膨張率差に起因した応力負荷に対する耐久性の向上が期待できる。本稿ではSi-IGBTへの適用を例にSA-MTの特性について述べる。

1. パワー半導体用エミッタ電極

1.1 電極材料への要求特性

IGBTは出力段にバイポーラトランジスタを用い、入力段にMOS-FET (Metal Oxide Semiconductor-Field Effect Transistor) を加え、それぞれの特徴である大電流制御と高速スイッチングを両立させたパワー半導体である。1960年台後半から1970年台にかけてIGBT動作の概念をもとに素子が発表された。実用化に大きく前進したのは1984年のノンラッチアップ型IGBT³⁾の登場で、これによって安定動作が可能になった。その後、パンチスルー型、ノンパンチスルー型へと世代が進み、スイッチング速度の高速化と低損失化の実現に注力された。現在はトレンチ型のゲート電極を用いたフィールドストップ型が主流となっている⁴⁾。IGBTは、ハイブリッド自動車の市場拡大に伴って需要が急増している。パワー半導体は日本と欧米の半導体メーカーの市場占有率が高く、省エネルギー化の高まりによって成長が期待できる分野である。

IGBTは、還流用ショットキーバリアダイオード (SBD; Schottky barrier diode) や温度センサなどの保護回路を組み合わせてパッケージングされている。図1は代表的なIGBTモジュールの概略図である。IGBTのゲートおよびエミッタ電極はワイヤボンディングでリードフレームなどの外部接続端子へと接続されている。ワイヤの素材には主にAlやCuが用いられる。コレクタ電極は、セラミックス基板上に回路を形成した回路基板 (Direct

*1 技術開発本部 電子技術研究所 *2 (株)コベルコ科研 ターゲット事業本部 技術部

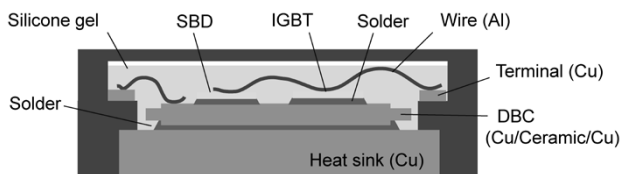


図1 一般的なIGBT モジュールの概略図
Fig. 1 Schematic diagram of a conventional IGBT module

Bonding Copper, 以下DBC基板という)に、はんだ接合を用いて電氣的に接続される。DBC基板はヒートシンク上に設置され、モジュール内部は短絡を防ぐためにシリコンゲルや樹脂などで封止されている。このため、モジュール内部には熱膨張率の異なる様々な部材が接合された構造となっている。例えばSiの熱膨張係数は $2.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、銅は $17 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、アルミニウムは $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、セラミックスはおよそ $3 \sim 5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ である。熱膨張率差によってパワー半導体素子やIGBTモジュールが破壊されないよう、発熱した素子はヒートシンクによって速やかに冷却される。

ハイブリッド自動車や鉄道向けのIGBTは、加減速のたびに頻繁にオンオフを繰り返す。このとき、素子上で最も応力が集中するのは接合界面であり、応力が繰り返し生じる⁵⁾。応力によってAl電極側にクラックが生じるのを避けるため、これまでは適切なはんだ材料を用いることによって電極とはんだとの界面に生じる応力を緩和する取り組みが行われてきた。電氣的な接続が必要な部分にはSn合金系のはんだ材料が多く用いられるが、熱膨張率差による応力はヤング率の低いはんだ材料を変形させて応力を緩和し、Al電極のクラックや、パワー半導体素子そのものの変形や破壊を防いでいた。

ところが素子の高温駆動に伴い、接合材料には材料強度の高いZn-Al系などの高温はんだ、あるいは温度に対して非可逆な焼結性の接合材が必要とされるようになった。これら高温接合材料のヤング率は従来のはんだ材料に比べて高く、材料強度が高いため、応力が接合材料以外の部材にも分散し影響を及ぼす恐れがある。そこで再びAl電極のクラックが問題になる可能性が想定され、電極材料にも材料強度の高い材料が好ましいと考えられるようになった⁶⁾。

ここで、Si-IGBTの電極として用いられる薄膜材料について述べる。図2にプレーナ型Si-IGBTの素子構造を示す。Si-IGBTにはキャリア取り出しのためのエミッタ電極、素子のスイッチングを制御するためのゲート電極およびゲート絶縁膜、Si基板、そしてキャリア注入のためのコレクタ電極からなる。エミッタ電極とコレクタ電極は金属ターゲットを用いたスパッタリング法によって形成される。以下、エミッタ電極材料の特徴について述べる。

エミッタ電極にはSi基板とのオーミック接触が可能なAl薄膜やAl-Si薄膜が用いられてきた。Si-IGBTは、電極形成後にドーパント活性化のために製造工程中で 400°C を超える高い熱履歴を受けるため、エミッタ電極材料には高い耐熱性が求められる。例えば、通常Si基板とAl電極を直接接続した後に高温の熱履歴を受けると、Si基板

とAl電極の間でスパイクと呼ばれる局所的な相互拡散が生じる。スパイクがSi基板内部のpn接合まで達すると、Si-IGBTの特性劣化を引き起こす。この現象は、基板中のSi原子が加熱によってAl電極内に固溶限の範囲で拡散して固溶し、そのときSi基板に生じた空孔をアルミニウム原子が置換するために生じるといわれている。拡散を抑制するためには、Si基板とAl電極の界面にTi薄膜などのバリアメタルを挿入するか、あるいはAl電極にあらかじめ固溶限以上のSi原子を添加したAl-Si電極を用いる。さらに、エミッタ電極材料には電極形状に加工するためのエッチング加工性が求められる。また、当然ながら電極形成に用いるスパッタリングターゲット材料にも高品質なものが求められる。

1.2 高強度Al合金電極 (SA-MT) の特徴

当社が開発した高強度Al合金電極 (SA-MT) は、従来のAl-Si電極と同様にSi-IGBTの製造プロセス中に受ける 500°C の熱履歴において、Si基板と電極の間の相互拡散を抑制できる。相互拡散による影響を評価するために、接合深さ100nmのpnダイオードに対してSA-MTを電極として用い、 500°C の熱処理を行ったときのダイオード特性を評価した結果を図3に示す。SA-MT電極は熱処理後も整流性を保っていることから、pn接合が維持できており、ダイオード特性に影響を与えるような相互拡散が生じていないことが分かる。

上記の特性を満たしたうえで、SA-MT薄膜はAl-Si薄膜を超える様々な特徴を有している。まず、Al-Si薄膜

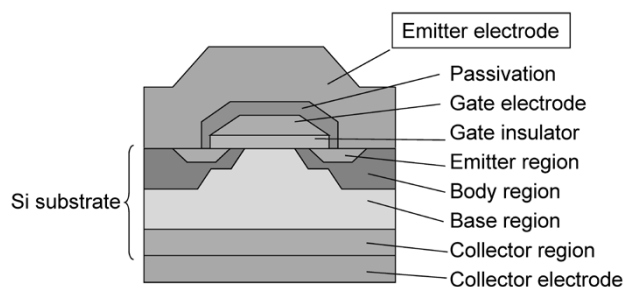


図2 IGBT素子構造の概略図
Fig. 2 Schematic diagram of a conventional IGBT device

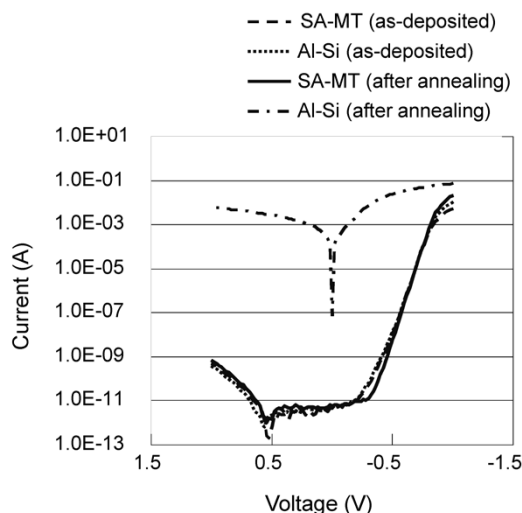


図3 アルミニウム合金電極を用いたPNダイオードのI-V特性
Fig. 3 I-V curve of PN diode using various aluminum-alloy electrodes

を電極形状に加工する場合、一般的にはウェットでのエッチング処理によって加工を施すが、加工の際に基板表面に粗大なSi析出物が残渣（ごんざ）として生じる問題がある。そこで、Si析出物を除去する目的で、ウェットでのエッチング加工後にさらにハロゲン系のプロセスガスを用いたドライエッチング処理が施される。これに対してSA-MT薄膜は、ウェットエッチングでの加工が可能である。エミッタ電極を模擬して膜厚4 μm のSA-MT薄膜を成膜した後、Al薄膜のエッチングに用いられるリン硝酸系エッチング液を用いてエッチング加工を行ったところ、**図4**に示すようにSA-MT薄膜はエッチング残渣が生じていない。

さらに、SA-MT薄膜の成膜に用いるスパッタリングターゲットは、**図5**に示すようにAlやAl-Siターゲットと比べて成膜速度が3割ほど大きいという特徴がある。Si-IGBTのエミッタ電極上には、外部への電気接続のために複数のワイヤが直接ボンディングされる。このため、電極直下の素子がボンディング時に破壊されないよう、通常は電極膜厚を4 μm 以上に厚くして保護する。スパッタリングで成膜する薄膜としては膜厚が厚く成膜に時間がかかるため、成膜速度の大きいSA-MTターゲットはSi-IGBTの生産性向上に寄与すると考えられる。

加えて、Al-Si薄膜の場合に膜中に形成される硬くて粗大なSi析出物は、その後の工程でワイヤを電極に圧着して電気接続を行う際に、Si析出物がSi基板に強く押し込まれて素子破壊を引き起こし（**図6**）、歩留りを低下させる恐れがある。この問題に対してSA-MT薄膜は**図7**に示すように析出物サイズがAl-Si薄膜と比べて微細となるため、上記のような破壊モードを抑制する効果が期待できる。

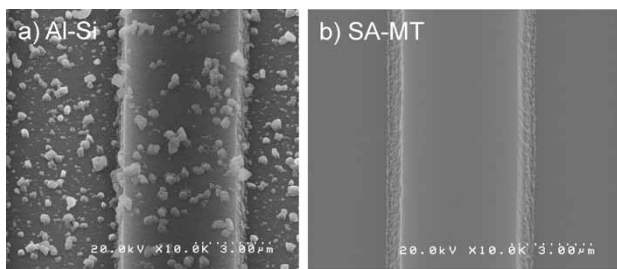


図4 エッチング残渣の評価結果

Fig. 4 Evaluation results of etching residue by aluminum etchant

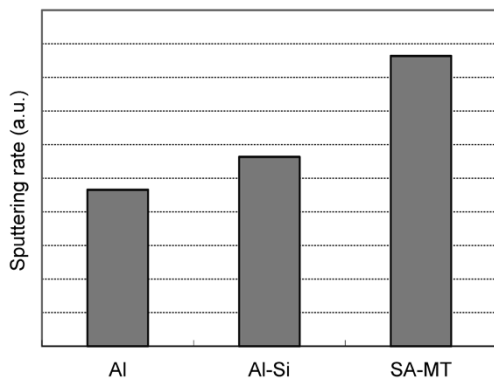


図5 アルミニウム合金ターゲットの成膜速度

Fig. 5 Sputtering rate of various aluminum-alloy targets using DC-magnetron sputtering system

SA-MTはこれら素子作成上のプロセス課題を改善したうえで、さらに高強度の特徴を示す。材料強度の指標には0.2%耐力を用いた。0.2%耐力とは引張試験によって得られる金属材料の強度指標の一つである。アルミニウム合金のように明確な降伏点が存在しない材料において、弾性変形と塑性変形の境界を示すために、引張試験によって得られた応力-ひずみ線図上で、除荷した後の塑性ひずみが0.2%になるときの応力値のことである。本試験にてSA-MTはAl-Siよりも高い強度を示すことが分かった。**図8**に示すように、ターゲット素材から切り出した試験片による引張試験では、SA-MTがAl-Siと比較して2倍以上高い0.2%耐力を示した。つぎに、実際のパワー半導体素子に用いる薄膜での耐力を比較するため、実際のデバイスプロセスを模擬して熱履歴を加え、室温に戻した後の薄膜での0.2%耐力を評価した。その結果、ターゲット素材での試験と同様に、Al-Si薄膜の2倍以上の値を示すことが分かった（**図9**）。

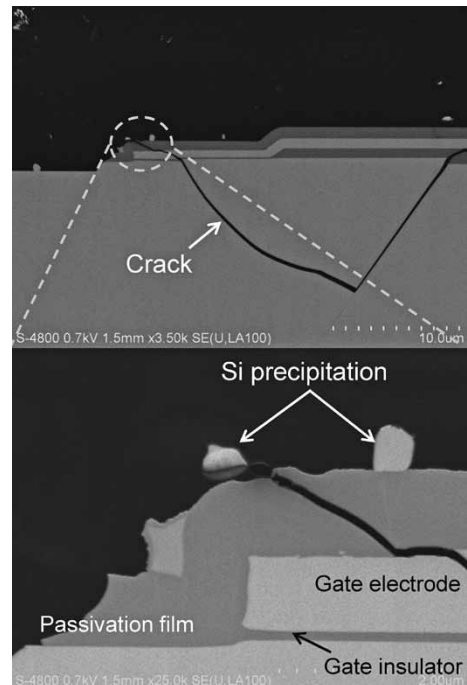


図6 Si析出物が原因でクラックが発生したSi基板の断面SEM像
Fig. 6 Cross-sectional SEM image of Si substrate with crack generation caused by Si precipitation

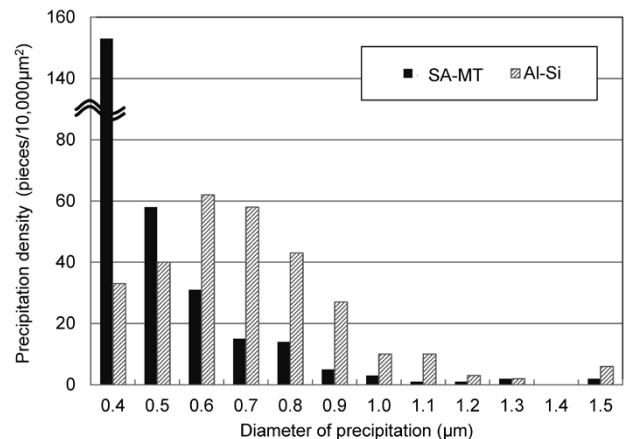


図7 アルミニウム合金薄膜中の析出物のサイズ分布

Fig. 7 Size distribution of precipitation included in aluminum-alloy films

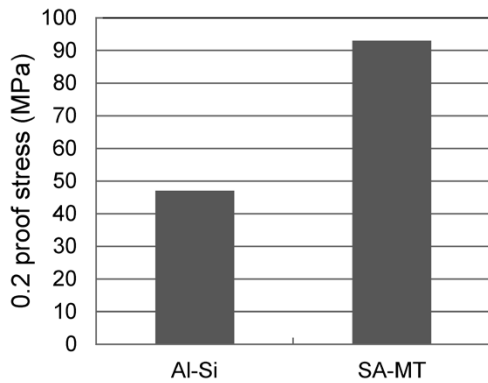


図8 アルミニウム合金ターゲット素材の0.2%耐力
Fig. 8 0.2% proof stress of various aluminum-alloy targets

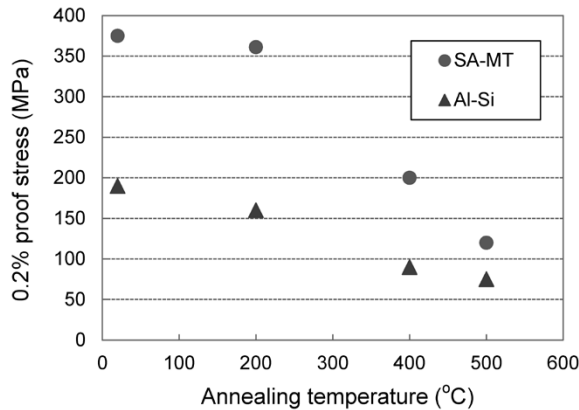


図9 アルミニウム合金薄膜の0.2%耐力
Fig. 9 0.2% proof stress of aluminum-alloy films

これらの特徴はSA-MTの合金設計によって得られており、Si-IGBTのプロセス上の温度履歴に適合して必要な機能が得られるよう設計されている。次節にて合金設計の詳細について述べる。

1.3 SA-MTの合金設計

エミッタ電極の基本的な特性は損なわず、高機能化を実現するために当社は、Al-Si薄膜をベースに、役割の異なる複数の添加元素を加えて所望の特性を発現する合金設計を行った。Si析出物は、低温の熱履歴を受けても粗大化しやすくAl-Si薄膜のエッチング液に溶解しないため、エッチング残渣の原因となる。析出物の微細化とエッチング残渣レスを実現するため、以下に示す複数の元素を添加した。

まず、アルミニウム中での拡散速度が遅く、高温までアルミニウム中に固溶するMoやTi、Taなどの高融点金属元素を加えた。高融点金属元素添加の特徴は、高温までアルミニウム合金薄膜の微細組織を安定化し、高融点金属元素がSA-MT薄膜の高温での塑性変形を抑制するとともに、高い機械的特性を付与する効果がある。微細な薄膜組織になると析出核形成が分散するため、Si析出物の微細化にも一定の効果があるとみられる。

さらに、アルミニウム合金薄膜中に低温で粒界拡散を生じ、アルミニウムと各添加元素の間で化合物を形成するGeやNi、Coなどの元素の複合添加も行った。これら

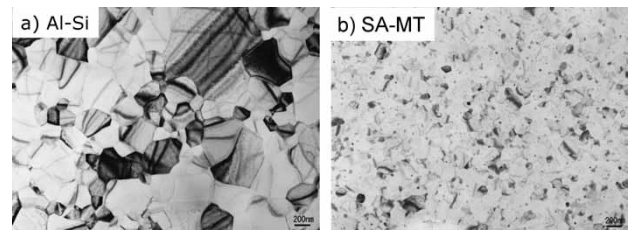


図10 アルミニウム合金薄膜の薄膜組織
Fig.10 Microstructure of aluminum-alloy films

の元素は、SA-MT薄膜の構成元素が熱履歴を受けたときに形成される析出物の析出核となるため、微細な析出物を高密度に分散させる効果がある。この結果、図10に示すようにSA-MT薄膜は微細組織を保ち、粗大な析出物形成を抑制できるため、エッチング残渣も生じにくくなっている⁷⁾。粒径が小さいことから、Hall-Petch則に従って高い材料強度を備えたAl合金膜が実現できたと考えられる。

2. スパッタリングターゲット材料

SA-MT薄膜の形成に用いるスパッタリングターゲット材は(株)コベルコ科研ターゲット事業本部が保有するスプレーフォーミング技術を用いて製造する。スプレーフォーミング技術の特徴は、合金ターゲットの製造に用いられる一般的な溶解鋳造法と比較して組織が微細で均一性が向上できる点にあり、組織不均一が原因で生じる異常放電を軽減できる⁸⁾。この技術を用いた高品質なターゲットの製造供給体制は既に整っている。

むすび=パワー半導体は次世代のエネルギー問題に対して日本がリードすることができる分野である。当社は金属素材事業だけでなく、薄膜材料設計やデバイス特性評価に関する経験と知識を有しており、SA-MTはこれらの技術を駆使して開発することができた。使いやすい材料で、求められる特性を満たしつつ信頼性を確保するためには、モジュール全体の構成も考慮に入れながら、材料の適合性を判断していかなければならない。本稿において素子プロセス上の利点は明らかにできた。今後は、高い材料強度を示すSA-MTが実際のパワー半導体モジュールの信頼性にどこまで寄与できるかについて見極め、パワー半導体モジュールの高信頼化への貢献を図りたい。

参考文献

- 1) 大橋弘通, 電気学会誌, 2002, Vol.122, No.3, p.168.
- 2) 両角 明ほか, エレクトロニクス実装学会誌, 2014, Vol.17, No.6, p464.
- 3) A. Nakagawa et al. IEEE IEDM Tech Digest, 1984, p.860-861.
- 4) 関 康和, 富士時報, 2001, Vol.74, No.2, p.103.
- 5) 山口浩二ほか, 富士時報, 2011, Vol.84, No.2, p.127.
- 6) 坂本善次, デンソーテクニカルレビュー, 2011, Vol.16, p.46.
- 7) 株式会社神戸製鋼所, パワー半導体素子用Al合金膜, 特許第5524905号, 2014-06-18.
- 8) 吉川一男ほか, R&D神戸製鋼技報, 2002, Vol.52, No.2, p.2.