

次世代パワー半導体素子のオーミック電極形成



研究ノート

前田 将克*

Formation of ohmic electrodes on next-generation power semiconductor devices

Key Words : SiC, GaN, Ohmic contact, Interfacial reaction

1. はじめに

今やパワー半導体素子は電動機器に不可欠な部品のひとつである。ハイブリッド自動車や電気自動車において、駆動モータの出力や再生ブレーキの電力回収は全てパワー半導体素子をつなげたモジュールで制御される。その他の家電製品や産業機器も、パワー半導体素子で電力制御するだけでなく、エネルギー効率向上を図っている。近い将来には、太陽光発電や風力発電に代表される再生可能エネルギープラントと知的送電網のインターフェイスにおいて電力をコンディショニングし、配分する役割も担うことになる。このように、パワー半導体素子の応用分野はより高負荷用途へと拡大している。負荷が高くなると、パワー半導体素子でのエネルギー損失が二つの点で問題となる。第一にエネルギー利用効率が低下する点、第二に損失分のエネルギーが素子を局所的に加熱し、素子の信頼性や寿命を著しく損ねる点である。このため、パワー半導体素子でのエネルギー損失低減が強く求められている。その対策として世界中で活発に進められているのが、シリコンに替わる次世代パワー半導体材料を用いた素子の研究開発である。炭化ケイ素 (SiC) および窒化ガリウム (GaN) がその候補材料であり、両者とも禁制帯幅が広いことによる多くの有益な特性を有している^[1]。半面、広い禁制帯が災いして金属電極との間に高い

ショットキー障壁を生じ、強靱でかつ低抵抗なオーミックコンタクトの形成が困難である。本稿では、我々が開発した界面反応制御法による p 型 SiC および n 型 GaN に対するオーミック電極形成技術について個々に紹介する。

2. p 型 SiC に対するオーミック電極形成

p 型 SiC に対して良好なオーミック特性が得られる材料として、 Ti_3SiC_2 が知られている^[2]。この Ti_3SiC_2 を SiC に隣接して形成するには、SiC 上に Ti と Al を積層してから 1273 K 程度の温度で熱処理する方法が採られている。熱処理中に SiC と Ti/Al 膜が界面反応して Ti_3SiC_2 が形成される。しかし、SiC と Ti/Al 膜の界面反応で生じる化合物は Ti_3SiC_2 だけではなく、非常に脆弱な Ti_5Si_3 や Al_4C_3 、仕事関数が浅く p 型 SiC との界面に高いショットキー障壁が形成される TiC 等が含まれている。このため、界面反応を適切に制御してこれらの望まれざる化合物の形成を抑制せねばならない。

図1は示差走査熱量計測曲線に現れた SiC/Ti/Al の反応挙動である。921 K から現れる吸熱ピークは Al の溶融に対応している。959 K からの発熱ピークでは Ti と Al が反応して $TiAl_3$ が形成される。そして 1270 K からの発熱ピークでは $TiAl_3$ と SiC の反応によって Ti_3SiC_2 が形成されることが判明した。この結果から SiC と Ti/Al 膜の界面反応を制御する上で重要となる二つの知見が得られる。第一に、SiC は Ti 相と直接反応するのではなく、 $TiAl_3$ 相から供給される Ti と反応することによって Ti_3SiC_2 を形成する。Ti-Al-Si-C 平衡状態図^[3]によると、Ti 相は SiC と Ti_3SiC_2 とは平衡することがない。このため、Ti と SiC の直接反応により Ti_3SiC_2 が形成されても、Ti はさらに Ti_3SiC_2 と反応して Ti_5Si_3 や TiC を生じることになる。一方、 $TiAl_3$ はわずかに Si を固溶



* Masakatsu MAEDA

1970年1月生
大阪大学大学院工学研究科材料物性工学
専攻 (1994年)
現在、大阪大学 接合科学研究所 助教
博士 (工学) 固相接合界面制御
TEL : 06-6879-4193
FAX : 06-6879-4193
E-mail : maeda@casi.osaka-u.ac.jp

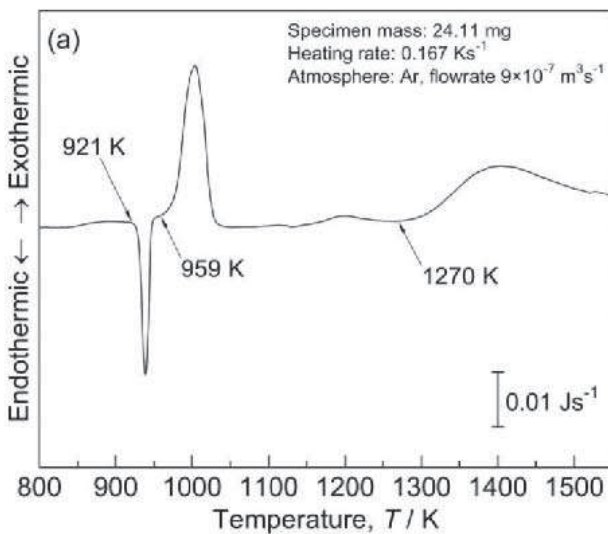


図1 SiC/Ti/Alの反応挙動のDSC曲線。

することでTi₃SiC₂と平衡し、副反応の進行を抑制することが可能となる。第二の知見は、Ti₃SiC₂形成にかかる2つの素反応が異なる温度で進行することから、熱処理温度を制御することで目的とする反応を選択的に進めることができることである。これらの知見から、SiC上に積層するTiとAlはモル比で1:3以上とし、Ti₃SiC₂形成温度よりも低い熱処理温度にてTiを残らずTiAl₃相としてからTi₃SiC₂形成温度以上に昇温する二段ステップ昇温熱処理法が考案された^[4]。図2はこの方法により作製したSiCと電極の界面組織である。副反応を生じることなくSiCに隣接してTi₃SiC₂を形成することに成功している。

半導体素子形成プロセスでは、目標温度まで急速昇温し、所定時間保持後に急冷する熱処理によって生産性を高めている。電極膜は非常に薄いため、バルクの場合よりも反応が速く進むが、昇温速度が高くなるとTiAl₃形成素反応が完了する前にTi₃SiC₂形成温度に達してしまい、副反応を抑制できなくなる。そうならないように、昇温過程のある温度で短時間昇温を停止して各素反応の完了を促すのである。このように、SiC/Ti/Alの反応挙動に関する知見は、適切な熱処理条件を見出すための基礎となる。

3. n型GaNに対するオーミック電極形成

n型GaNに対するオーミック電極形成には、GaN上にTiとAlを含む多層膜を積層してから熱処理する方法が採られている^[5]。この熱処理によ

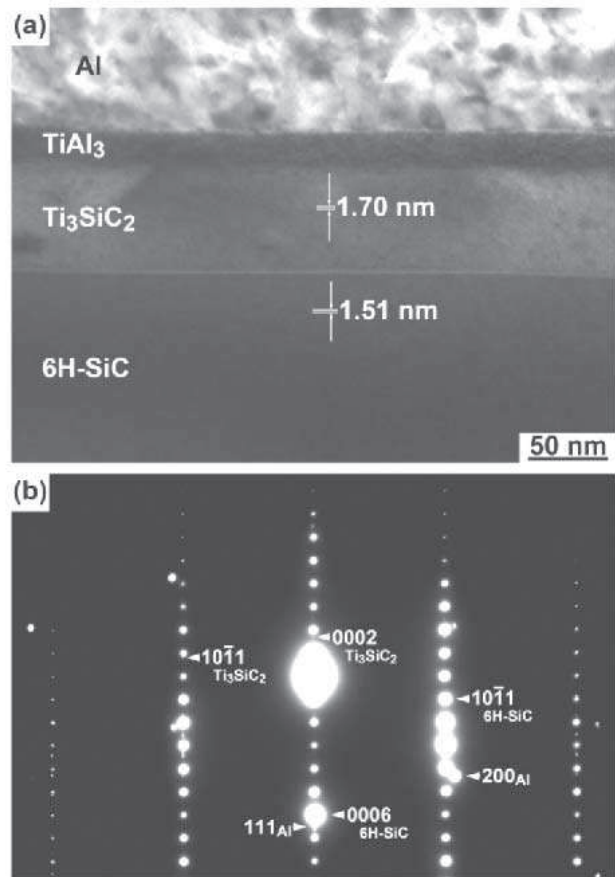


図2 二段ステップ昇温熱処理法により形成した界面組織。

てGaNに接して形成される相はTiNである。しかし、それ以外の電極部分は多くの金属間化合物相で構成されており、固有電気抵抗が高く、韌性が低い。このため、GaNに接してTiNを形成しながら他の部分の組織を金属に保つ技術が求められる。ところが、Tiのみを成膜して熱処理しても、TiNはなかなか形成されない。TiのN溶解度が高く、また、Ti中のN拡散が高速であるためだが、さらに悪いことに、TiNに先んじてTi₂NやTi-Ga系金属間化合物が形成される。いかにしてTiNの形成を促進しながら、他の副反応を抑制するかが課題である。

その解決策として、薄いC層をGaNとTiの間に配置する方法が考案された^[6]。このC層は熱処理において直ちにTiと反応し、TiCを形成する。TiにとってTiC形成はTiN形成に比べてはるかに容易で迅速である。加えて、TiCはTiNと全率固溶し、ともにNaCl型結晶構造で格子定数もほぼ等しい。仕事関数も近接した値である。このような特徴を有するTiCに着目し、これを前駆体としてGaNと反応させることで副反応を抑制しながら、TiNに近接

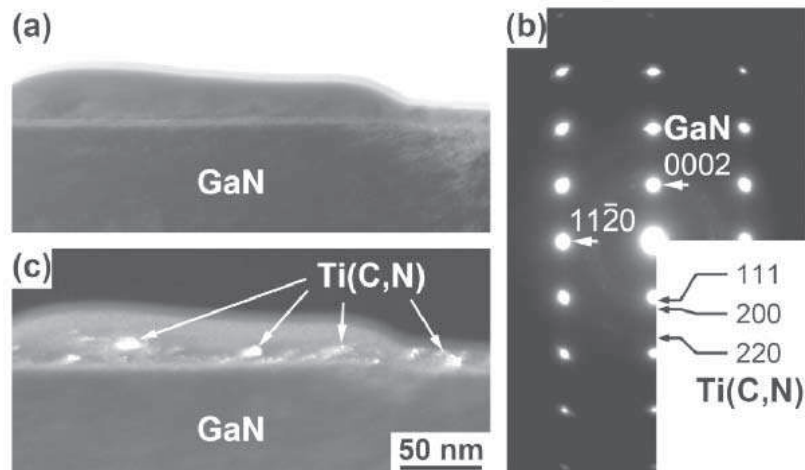


図3 GaN/C/Tiを873 Kで300 s熱処理した後の界面組織。

した性質を有するTi(C,N)のみを界面に形成してオーミック特性を獲得し、他の電極部をTi相のまま維持することを試みた。図3はGaN/C/Ti試料を873 Kで300 s熱処理後の界面組織である。GaNに隣接してTi(C,N)を形成しただけでなく、副反応抑制にも成功している。

4. おわりに

以上に掲げた例はいずれも、目標とする界面構造が明確になっており、どのような界面反応を促進あるいは抑制したいのか、はっきりしていた。そのような界面反応制御の課題に対して、我々は個々の材料特性に合った適切な処理技術を提案することに成功した。これからは、例えばp型GaNのように、その目標を模索するところから始めなければならない電極材およびそのプロセスの開発にも取り組んでいかねばならない。これらの技術が集積してようやくひとつの半導体素子を作ることができるようになる。さらに、その半導体素子を外部回路に配線実装する技術も難産が予想されている。次世代パワー半導体素子は従来のシリコン素子よりも100 K以上高い温度での安定動作が期待されているので、配線材も従来のAlでは耐えられず、Cuにシフトして行かねばならないが多くの困難を伴う。我々はこの課題

でも成果を挙げ^[7]、次世代パワー半導体素子の早期実現に向けて取り組んでいる。

引用文献

- [1] 荒井和雄, 吉田貞史 (編): 「SiC素子の基礎と応用」 オーム社, 2003, 10-33.
- [2] S. Tsukimoto, K. Nitta, T. Sakai, M. Moriyama and M. Murakami: J. Electron. Mater., 33 (2004) 460-466.
- [3] J.C. Viala, N. Peillon, F. Bosselet and J. Bouix, Mater. Sci. Eng. A 229 (1997) 95-113.
- [4] M. Maeda, K. Nonomura, Y. Takahashi and K. Tenyama: Proc. 8th Int. Conf. Brazing, High Temperature Brazing and Diffusion Bonding (LÖT 2007), Jun. 2007, Aachen, 84-87.
- [5] S.N. Mohammad: J. Appl. Phys., 95 (2004), 7940-7953.
- [6] M. Maeda, N. Matsumoto and Y. Takahashi: Proc. Materials Science and Technology (MS&T) 2010, Oct. 2010, Houston, 2732-2742.
- [7] M. Maeda, T. Sato, N. Inoue, D. Yagi and Y. Takahashi: Microelectron. Reliab., 51 (2011) 130-136.