Osaka University Knowledge Archive

Title	Ohmic Contact Formation of Gallium Nitride and Electrical Properties Improvement
Author(s)	Aiman Bin, Mohd Halil
Citation	大阪大学, 2016, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/55936
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

Form 3

Abstract of Thesis

Name (Aiman bin Mohd Halil)	
Title	Ohmic Contact Formation of Gallium Nitride and Electrical Properties Improvement (窒化ガリウムのオーミックコンタクト形成並びにその電気特性改善)

Abstract of Thesis

Silicon (Si) is still now used mainly as material for semiconductor devices. But, it is important to seek for better alternative materials for use in the next-generation semiconductor devices due to the physical limitation of silicon. Gallium nitride (GaN) is one of the most promising candidates. Also, GaN has an advantage as a high frequency communication element. GaN-based semiconductor devices promise higher energy efficiency devices with capability of handling higher power and longer service life compared with silicon devices. However, in spite of having a significant development in the crystal growth and device processing technology of light emitting diodes (LED) and laser diodes (LDs), the application of GaN semiconductor as semiconductor devices is still far from real. In the present study, the strategy to improve the electrical properties of n-type and p-type GaN contacts has been carried out.

In the case of n-type GaN contact, to seek for the most effective methods to improve the electrical properties of the contact, an alternative method to form nitrogen-vacancies (N-vacancies) near the interface to lower the contact resistance have been developed. Additionally, to clarify the most suitable surface orientation of n-type GaN contact, unconventional contact orientations have been observed and compared.

In the case of p-type GaN contact, a different approach to finding an appropriate contact material for p-type GaN has been used in the present study. GaN shows a high degree of similarity with SiC. The present study demonstrates the idea by using the same SiC contact material (Ti_3SiC_2) contacts on p-type GaN and examining the properties of the contacts. For comparison, the contact properties of conventional monolayer contact of p-type GaN such as Au, Ni and also have been observed.

Additionally, in the present study, in order to improve the electrical properties of p-GaN contact, the enhancement of hydrogen (H) release from p-GaN is attempted by applying current flow through the p-GaN substrates during low temperatures annealing. By enhancing the H release from p-GaN, the electrical properties of p-GaN contact interface can be improved. The higher carrier (accepter) concentration achieved by enhancing the H release from p-GaN will reduce the width of the Schottky barrier (SB) formed at the contact interface. By thinning the SB width, the probability of carrier to tunneling through the SB can be increased, resulting in improvement of the electrical properties of the p-GaN contact.

The present study is consisting of 7 chapters.

In the chapter 1, the background of semiconductor devices and wide band-gap semiconductor are explained. Next, the present issues related to p-type and n-type GaN is pointed out. The objective and research flow are explained.

In the chapter 2, the important theories related to ohmic contact formation of GaN and improvement of electrical conductivity are explained.

In the chapter 3, the experimental procedure used in present study is described. There are specimen preparations, heat treatment and, structural and electrical analysis.

In the chapter 4, results related to electrical conductivity improvement of n-type GaN are discussed. The first topic is effect of N-vacancies formation to electrical conductivity. Ti contact films were formed on n-type GaN after Ar ion irradiation of the substrate for 300, 600, 1200, 2400 and 3600 s. Ti_2N is formed adjacent to substrate by the Ti deposition. It is likely that a huge amount of N-vacancies is formed within the GaN sub-surface near to the contact. I-V conduction profiles show that ohmic conduction is achieved. Furthermore, the conductance of the contacts is increased by prolonging the irradiation time. However, extensive irradiation more than 3600 s shows no further improvement in contact conductance. It is likely due to the phase transformation from GaN to Ga-rich

at the GaN sub-surface. The Ga-rich phase enhanced the formation of Ti-Ga compound at the interface during the Ti deposition and reduce the number of N-vacancies within the sub-surface of GaN. The second topic in this chapter is effect of n-type GaN crystal orientations to electrical conductivity. Ti contact films were formed on various orientation of GaN surface. The contact formed on (0001) Ga-face shows the highest electrical conduction in the as-deposited state. However, the conduction deteriorates by annealing even at a low temperature of 773 K. On the other hand, the conductance of the contacts on other three surfaces shows some improvement by annealing at 973 K. However the conductance deteriorates by further annealing at 973 K for 300s. The deterioration of the electrical conductance is attributed to the formation of Ti-Ga compound at the interface, as shown in the XRD patterns and TEM observation.

In the chapter 5, results related to contact formation and interfacial structure observation of p-type GaN are discussed. To the investigation of the interfacial structure of GaN and Ti_3SiC_2, Ti-Si-C ternary film with a composition stoichiometrically close to Ti_3SiC_2 has been deposited on p-type GaN. Polycrystalline Ti_3SiC_2 phase has been formed on the substrate after annealing at 973 K and 1073 K. However, after the annealing at 973 K and 1073 K, the dominant carrier-type of p-type GaN has inverted to n-type. This is likely due to the increasing of N-vacancies in the p-type GaN sub-surface resulting from the out-diffusion of N atoms during the annealing at high temperature. The direct-current conduction test shows that ohmic-like contacts have been achieved after the annealing. These ohmic-like contacts are likely formed between n-type GaN (inverted from p-type by the annealing) and the byproducts of Ti_3SiC_2 formation (Ti_5Si_3 and $TiSi_2$), the residual Ti phase and/or the TiN phase.

Additionally, to improve the electrical conduction of p-type GaN contact by thinning the SB at the interface, contact formation processes of Au and Ni with a low annealing temperature have been investigated. The investigation of the interfacial structure and electrical conduction of p-type GaN/Au and p-type GaN/Ni contacts after annealing at 673 K for 3600 s show some identical results. The dominant carrier-type of both contacts are maintained after the annealing. XRD analysis and TEM observation of both contacts revealed that the no intermetallic compound is formed at the interface after the annealing. Furthermore, the electrical conduction profile of these contacts show some improvement after the annealing at 573 K and 673 K for 3600 s. From these investigations, it can be conclude that annealing at 673 K for 3600 s is an adequate annealing condition to form Au and Ni contact on p-type GaN, while improving the electrical conduction and while maintaining the p-type carrier.

In the chapter 6, the results related to H release enhancement from p-type GaN are discussed. In order to improve the electrical conduction of Mg-doped p-type GaN contacts, enhancement of H release from GaN substrates is attempted by applying current flow during annealing. The electrical conduction profiles of the p-type GaN/Ni contact annealed at 573 K and 673 K for 3600 s while subjected to current flow show some improvement compared to the contact annealed without applying the current flow. From these results, it can be understood that by applying current flow through the GaN substrates during annealing process, H release form GaN substrates can be enhanced by even annealing at low temperature. To understand the mechanism of H release by applying current flow during annealing, the change in current values p-type GaN contacts during annealing has been observed. By using regression analysis and kinetic model, the electrical conduction improvements achieved by applying current flow through GaN substrate during annealing has been analyzed. The results suggest that that by applying current flow during annealing and by forming a contact with material that H can diffuse into such as Pd, the H release from GaN substrate can be enhanced and the electrical conduction of p-type GaN contact can be significantly improved.

Finally in the chapter 7, the conclusions of the present study are explained.

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　Aiman bin Mohd Halil　）			
論文審査担当者		（職）	氏　名
	主 査	教 授	高橋　康夫
	副 査	教 授	伊藤　和博
	副 査	教 授	平田　好則

論文審査の結果の要旨

現在，主に，シリコン（Si）が半導体デバイス用材料として使用されている．しかし，シリコンの物性的な限界により，次世代化合物半導体デバイスが Si 半導体の代替材料として開発される事が叫ばれる様になって久しい．しかし，その開発は遅遅として進んでいない．Si 半導体の代替材料として，窒化ガリウム（GaN）が，有望な候補の一つとして挙げられる．GaN は，高周波通信デバイスとして Si より高速通信が可能で，大きな利点を有している． GaN 系半導体デバイスはシリコンデバイスに比べて，高電力および長寿命を処理する能力があるからで，より高エネルギー効率のデバイスとして有望視されている．発光ダイオード（LED）及びレーザーダイオード（LD）の結晶成長とデバイス処理技術の著しい発展を持つにもかかわらず，実際の所，GaN 系半導体のアプリケーション，特に通信機器への応用は，まだまだ，ほど遠いと言わざるを得ない．一つの理由として，GaN の低抵抗のオーミック電極形成の問題が挙げられる．本研究は，n 型及び p 型 GaN コンタクト（電極形成）の電気的特性を向上させるための方法を提案し，電子顕微鏡観察を行い，ナノレベルでの界面構造解析を行い，電気特性改善を試みたものである．

n 型 GaN コンタクトに対しては，コンタクトの電気的特性を改善するための最も効果的な方法を提案している．すなわち，界面付近に接触抵抗を下げるための窒素空孔を形成する方法を提案し，その効果を実証している．また，n 型 GaN コンタクトの最適な面方位を明確にするため，コンタクト結晶方位関係を観察し，比較している．

p 型 GaN コンタクトの場合に関しては，p 型 GaN の適切な低抵抗コンタクト形成を発現するために、新しいアプローチを試みている．第一段階として，窒化ガリウムは，SiC と高度な類似性を示しているので，本研究では，p 型 SiC コンタクト材料（Ti_3SiC_2）を，p 型 GaN のコンタクト材料として，適用し，その結果を検討している．このコンタクト電気特性を調べることによって，考え方の成否を詳細に検討している．一方，p 型 GaN の従来の単層のコンタクト材料，金（Au）及びニッケル（Ni）のコンタクト電気特性も電子顕微鏡観察を基に，検討している．

さらに、本研究では、p 型 GaN コンタクトの電気的特性を向上させるために、低温熱処理中の p 型 GaN 基板に電流を印加することによって、p 型 GaN から水素（H）を放出させ，その効果を詳細に検討している． p 型 GaN から H の放出が促進される事をつきとめている．そうする事によって，p 型 GaN コンタクトの電気的特性が向上することができることを明らかにしている．p 型 GaN から H の放出の促進によって、高いキャリアの濃度が達成され，接触界面に形成されるショットキー障壁（SB）の幅が減少されるからであることを明らかにしている．すなわち， SB の幅を薄くすることで、トンネリングするキャリアが増加し，p-GaN コンタクトの電気的特性の改善ができるのである．

本論文はこれらの研究成果についてまとめたもので、全 7 章からなる．

第 1 章では，半導体装置及びワイドバンドギャップ半導体の背景について説明している．次に，p 型及び n 型 GaN に関わる問題を提起している．本研究の方針と研究の流れが説明されている．

第 2 章では，GaN のオーミックコンタクト形成および導電率の向上に関する基本となる重要な理論について記述されている．

第 3 章では，本研究で用いた実験手順が記述されている．試料の準備，熱処理，微視的界面構造の観察方法および電気的計測方法が述べられている．

第 4 章では，n 型 GaN の電気伝導度の向上に関する結果が説明されている．最初のトピックスとして，N 空孔形成の電気伝導性の効果が述べられている．300、600、1200、2400 および 3600 秒で基板にアルゴンイオンを照射した後、n 型 GaN の上にチタン（Ti）コンタクトを形成し，Ti 成膜によって Ti_2N が基板との界面に形成されていることを明らかにしている．すなわち，アルゴンイオンスパッターによって N 空孔量が GaN 表面内に形成されているからと考えられる．電流電圧プロファイルの実験結果から，オーミックコンタクトが達成されることを示している．また，コンタクトの伝導度は，照射時間を長くすることによって増大する．しかし，3600 秒以上の照射によって，コンタクト伝導度はさらなる改善を示さないことも明らかにしている．その理由として，GaN 表面が Ga リッチ相に相変態するからであることを示している． すなわち，Ga リッチ相に Ti を成膜すると，界面で Ti-Ga の化合物を形成して，GaN 表面の N 空孔の数を減らすためである．次のトピックスは，n 型 GaN 結晶方位の電気伝導度に影響である．Ti コンタクト層を，GaN 表面の色々な結晶方位に形成，電気的特性を調査している． 熱処理前では，(0001) Ga 面上に形成されたコンタクトが最も良い電気伝導を示すことが分かった．しかし，773 K での熱処理によって，伝導度が劣化することをつきとめている．一方，他の方位面でのコンタクトに対しては，伝導度が 973 K の熱処理により改善されることを示している．しかしながら，さらに 973 K 300 秒で熱処理によって，すなわち，熱処理時間を長くすると，伝導度が劣化することを明らかにしている．X 線回折（XRD)パターンおよび透過電子顕微鏡（TEM）観察結果を基に，電気伝導度の劣化は，コンタクト界面での Ti-Ga の化合物の形成に起因することを明らかにしている．

第 5 章では，p 型 GaN のコンタクト形成及び界面構造の観察が議論されている．GaN と Ti_3SiC_2 の界面構造調査のために，Ti_3SiC_2 と化学量論的に近い Ti-Si-C 三元膜組成を p 型 GaN 上に成膜している．973 K 及び 1073 K での熱処理によって，多結晶の Ti_3SiC_2 相を形成したが，その際の熱処理によって，p 型 GaN の支配的なキャリアが、電子に反転していることが判明した．これは，高温での熱処理により，N 原子が外界に拡散放出され，p 型 GaN 表面近傍の N 空孔が増加したからだということを明らかにしている．電流電圧プロファイルから，オーミックコンタクトが達成されることを示しているが，このオーミックコンタクトは、n 型に反転した GaN と Ti_3SiC_2 を形成する時の副産物（Ti_5Si_3 と $TiSi_2$），すなわち，残留チタン又は TiN との間に形成された界面によって生じたと考えられる．

第 6 章では，p 型 GaN からの H を放出に関する結果を検討している． Mg ドープ p 型 GaN コンタクトの電気伝導性を向上させるためには，低温の熱処理中に電流を印加することによって，GaN 基板から H 放出の促進を試みている．p 型 GaN とニッケルコンタクトの電気伝導プロファイルは、3600 秒間，それぞれ 573 K と 673 K で熱処理中，電流を印加することよって，熱処理のみのコンタクトに比べて、改善されることを明確化している．これらの結果から、処理中に GaN 基板に電流を印加することにより，低温であっても GaN 基板からの H 放出を高めることができると考えられる．この方法により，H 放出のメカニズムを理解するために，処理中の p 型 GaN コンタクトの電気測定を行っている．熱処理中に GaN に電流を印加すると電気伝導性が向上するが，その向上する過渡現象の過程を回帰分析および速度論的モデルを提案し、解析している．結果として，熱処理中の電流を印加する場合，及び，H を吸収・吸蔵するパラジウムコンタクトと比較して，GaN からの H 放出と p 型 GaN コンタクトの電気的特性の向上の関係を議論し，通電効果を明らかにしている．

第 7 章は，本研究で得られた成果の総括である．

以上のように、本論文は n 型及び p 型 GaN コンタクトの電気的特性を向上させるための方法を試み，その挙動と微視的コンタクト界面構造を明らかにしたものである．n 型 GaN のコンタクトでは、熱処理なしでも、オーミックコンタクトが得られ，そのオーミックコンタクトを保つために熱処理の制御が必要ということを示している．p 型 GaN では，H 放出の促進によって低温熱処理でも電気伝導が改善できることを示している．

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める．