19p-PG3-24

Ni/Sn の熱処理による Ge(100) 上へのエピタキシャル NiGe 形成 Formation of epitaxial nickel monogermanide on Ge(100) by annealing Ni/Sn bilayer

産総研 連携研究体 グリーン・ナノエレクトロニクスセンター

Collaborative Research Team Green Nanoelectronics Center, AIST

<sup>°</sup>小池 正浩, 上牟田 雄一, 守山 佳彦、鎌田 善己, 黒澤 悦男, 手塚 勉

M. Koike, Y. Kamimuta, Y. Moriyama, Y. Kamata, E. Kurosawa, and T. Tezuka

massahiro.koike@aist.go.jp

Ge *n*MOSFET 開発において、メタル (例えば NiGe)/*n*Ge のコンタクト抵抗  $R_C$  が高くなることが問題になっている。メタルのフェルミレベルが Ge の価電子帯付近にピニングされ、*n*Ge に対してはショットキーバリアハイト (SBH) が高くなるためである [1]。

*R<sub>C</sub>* を低減する方法には、SBH を本質的に低減する方法と実効的に低減する方法の二つがあり、前者の方法として、 例えば Ge にメタルをエピタキシャル成長させる方法がある [2]。また界面が平坦な膜を形成する方法として、メタルと 基板の間に反応制御層を挿入する方法が報告されている [3]。

そこで本研究では、Ge中に拡散しても電気特性に影響を及ぼさないことが期待される Sn を Ni と Ge の反応制御層 として挿入し Ni/Sn を熱処理して、エピタキシャル NiGe/Ge(100) が形成でき、R<sub>C</sub> 低減できるかを検討した。

SiO<sub>2</sub> 素子分離形成した Ge(100) 上にスパ ッターで Sn(1-15 nm)、続いて Ni(10 nm) を堆積した。そして RTA により熱処理 (350°C, 1 min) して Ni<sub>x</sub>Ge を形成した。こ うして形成した Ni<sub>x</sub>Ge/Ge(100) の J-V 特 性を調べ、ショットキー電流の理論式 [3] と フィッティングして SBH を見積もった。

Ni/Sn により形成した Ni<sub>x</sub>Ge は Ge(100) 上にエピタキシャル成長することが TEM 観 察の結果明らかになった [Fig. 1(b)]。Sn 無 しで形成した通常の NiGe [Fig. 1(a)] に較 べて、Ni<sub>x</sub>Ge/Ge 界面は平坦であり、グレイ ンサイズは大きい (>500 nm)。Ni<sub>x</sub>Ge がエ ピタキシャル成長する適切な Sn 層の膜厚範 囲があり (1-5 nm)、厚い場合 (12-15 nm)



FIG. 1: TEM images of  $Ni_xGe/Ge(100)$  fabricated by annealing Ni(10 nm)/Sn bilayer on Ge(100) at  $350^{\circ}C$  in  $N_2$  for 1 min. The thicknesses of the Sn layers were (a) 0 nm, (b) 1-5 nm, and (c) 12-15 nm.

には Ni<sub>x</sub>Ge はエピタキシャル成長せず、不連続に成長する [Fig. 1(c)]。 TEM-EDX によると、Ni<sub>x</sub>Ge の Ni/Ge 組成比は主に ~ 1 であり、 表面付近では一部で ~ 2 である。また、Sn は表面及び Ni<sub>x</sub>Ge/Ge 界 面において検出された。

TEM 像の FFT (fast Fourier transform) により構造を解析し上述 の TEM-EDX による組成分析の結果とあわせて考えると、Ni<sub>x</sub>Ge は主 に NiGe (nickel monogermanide) であることが判明した。尚、表面に 一部存在するコントラストが強い領域は Ni<sub>2</sub>Ge (dinickel germanide) である。

このエピタキシャル NiGe は Ge(100) 上に格子整合するように成長 している (Fig. 2)。格子面間隔  $d_{\text{NiGe}(121)}$  は 0.199 nm であり、 $d_{\text{Ge}(01\overline{1})}$ は 0.402 nm である。また TEM 像からその二つの面がなす角度  $\theta$  は ~ 9° である。これらの値は、 $d_{\text{Ge}(01\overline{1})}\cos\theta = 2d_{\text{NiGe}(121)}$ の関係をほ ぼ満たす。通常 NiGe は Ge(100) 上にエピタキシャル成長しないが、 Ni/Sn を熱処理するだけで、このように Ge(100) 上に NiGe をエピタ キシャル成長できることがわかった。

Ni/Sn の熱処理によって NiGe がエピタキシャル成長した理由として、Sn が Ni と Ge の反応制御層 [4] として働いた可能性がある。Ni が Sn 層を拡散し、Ge(100) に達すると反応して、NiGe が形成される。Sn が介在し Ni と Ge が直接反応しないことにより NiGe がエピタキシャル成長したと予想される。

エピタキシャル NiGe/nGe(100) の J-V 特性を調べたところ、通常の NiGe/nGe(100) より逆方向電流が約二桁高くなることがわかった (Fig. 3)。 電流増大が SBH 低減のみによるものと仮定すると、SBH は ~ 0.1 eV 低減し たことになる。電子濃度と  $R_C$  の関係 [5] から考えると、この SBH 低減によっ て、例えば電子濃度が  $5\times10^{19}$  cm<sup>-3</sup> の  $n^+$ Ge(100) ソース・ドレイン上にエピ タキシャル NiGe を形成すれば、 $R_C$  をさらに 1/3 まで減らすことができる。

このように、Ni/Sn を Ge(100) 上で熱処理すると、エピタキシャル NiGe/Ge(100) が形成でき、nGe(100) に対して SBH が  $\sim$  0.1 eV 低減できる ため、コンタクト抵抗を低くできることが明らかになった。

本研究を進めるにあたり、多大なご協力をいただきました産総研テクニカ ルスタッフの方々に感謝します。本研究は政府の最先端研究開発支援プログ ラムにより助成されたものである。



FIG. 2: TEM image of NiGe fabricated with Ni/Sn bilayer. The enlarged view of Fig. 1(b).



FIG. 3: J-V characteristics of NiGe/nGe(100) fabricated by annealing Ni/Sn bilayers.

[1] M. Koike et al., Appl. Phys. Lett. 102, 032108 (2013). [2] K. Kasahara et al., Phys. Rev. B 84, 205310 (2011).

[3] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed. (Wiley-Interscience, New York, 1981).

[4] F. Fenske et al., Appl. Surf. Sci. 104/105, 218 (1996). [5] H. Miyoshi et al., Ext. Abstr. SSDM 2013, 598.