Niを添加したSiショットキー形ダイオード の電気的特性

正員 黒 須 楯 生 (東海大)
 非会員 江 藤 圭 三 (東海大)
 非会員 秋 葉 幸 男 (東海大)
 非会員 大 串 秀 世 (電総研)
 正員 飯 田 昌 盛 (東海大)

1. ま え が き

深い不純物準位を形成する Ni 原子を添加した高抵抗 Si バルクの電気的特性は、従来多くの研究者によって研究されている^{(1)~(4)}。その結果、Si 中における Ni 原子の固溶度、二つのアクセプタを形成する Ni 原子のエネルギー準位の位置、電子や正孔に対する捕獲確率などが明らかにされてきている。しかし、Ni を添加した Si の接合構造あるいは整流接触構造ダイオードにおける電流輸送機構の解明の研究は、現在のところそれほど多くは行なわれていない⁽⁵⁾。

著者らはこの点に着目し、Ni を添加した Si のショットキー形ダイオードを作製し、その電気的特性を調べた。その結果、電圧-電流特性のオーミック領域から算出されたダイオードの抵抗率は、バルクのみ抵抗率よりも大きくなっていることがわかった。これまで、高抵抗半導体で作られたダイオードの低電圧領域での輸送機構では、接合部や整流接触近傍の空間電荷領域は無視されて解析されてきている⁽⁶⁾。本論文では上述の実験結果に基づいて、Ni 添加 Si バルクの電気的特性を調べると共に、ショットキー形ダイオードの

整流接触近傍の空間電荷領域を考慮し、Ni 原子が作る深い不純物準位のエネルギー的位置や不純物濃度の関係を用いた、低電圧領域での電流輸送に関する解析を試みた結果について報告する。

2. 実験および実験結果

〈2.1〉 Ni 添加バルクの作製と電気的特性 基板として用いた Si は、室温において抵抗率が $77\Omega\cdot\text{cm}$ の n 形ウェーハである。このウェーハを #2000 のカーボランダムにて研磨し、表面処理した後 Ni の無電解めっきを施し、 $1,100^\circ\text{C}$ で 7 時間加熱処理を行ない Ni を拡散した。この温度での Ni 原子の Si 中への熱拡散係数は $10^{-5}\text{cm}^2/\text{s}$ であり、7 時間という拡散時間は Ni が一様に拡散されるのに十分な時間である。Ni 添加後の Si バルクの伝導の形は、熱起電能法を用いて測定した結果、ウェーハ両面とも同じ程度の弱い n 形（以下、これを p 形と呼ぶ）であり、Ni 原子は一樣に拡散されているものと考えられる。抵抗率は、室温で約 $10^4\Omega\cdot\text{cm}$ であった。Ni 添加前の抵抗率と比較すると約 130 倍に増加していることになり、このことは Ni 原子が作る不純物準位がアクセプタ形を形成していることを意味している。Si 中の Ni 原子は二つのアクセプタ準位を形成することが知られているが、特に伝導帯に近い準位の活性化エネルギーは、伝導帯下端より $0.34\sim 0.41\text{eV}$ と各研究者の間で異なった値が報告されている^{(1)~(4)}。深い準位の活性化エネルギーの値は、伝導機構を議論するうえで大切な要因となる。従って、本研究で用いた試料に対しても、それぞれの活性化エネルギーの値を求める必要がある。

アクセプタ準位の活性化エネルギーを求めるため、

Electrical Characteristics of Si Schottky Type Diode Doped with Ni. By Tateki Kurosui, Member, Keizo Etoh, Non-member, Yukio Akiba, Non-member (Department of Electronics, Faculty of Engineering, Tokai University), Hideyo Okushi, Non-member (Electrotechnical Laboratory) & Masamori Iida, Member (Department of Electronics, Faculty of Engineering, Tokai University).

黒須楯生：正員，東海大学工学部電子工学科
 江藤圭三：非会員，東海大学工学部電子工学科
 秋葉幸男：非会員，東海大学工学部電子工学科
 大串秀世：非会員，電子技術総合研究所
 飯田昌盛：正員，東海大学工学部電子工学科

図1 抵抗率の温度変化および空乏層過渡容量の時定数 (τ) の温度変化

Fig. 1. Temperature dependences of resistivities, and temperature dependence of time constant (τ) in transient capacitance of depletion layer.

試料の抵抗率の温度依存性を測定した。移動度の温度依存性 ($\mu \propto T^{-2.2}$)⁽³⁾ および電子の有効状態密度の温度依存性 ($N_c \propto T^{1.5}$) を考慮し、キャリア濃度のみの温度依存性に変換した結果を図1の ν 形の曲線に示す。n形の曲線には Ni 添加前の n 形 Si の同様な温度依存性も示してある。 ν 形の直線のこう配より、伝導帯に近い Ni 単位の活性化エネルギー $\Delta E_u = 0.43$ eV が得られた。これらの実験結果の妥当性を得るために、他の方法、すなわち DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) 法により活性化エネルギーを求めた。その結果を図1の DLTS 曲線に示す。試料としては ν 形と同じ材料で作製したショットキーダイオードを用いた。この結果より活性化エネルギーを求めると、 $\Delta E_u' = 0.41$ eV が得られた。これは先に求めた ΔE_u の値に近い値を示す。以上の結果より、本研究で用いた試料の伝導帯下端に近い Ni 単位の活性化エネルギーは 0.42 ± 0.01 eV となる。この結果は Chiavarotti 氏ら⁽⁴⁾の報告とよく一致している。

価電子帯に近い単位の活性化エネルギーは、抵抗率 $8.2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ の p 形 Si に $1,100^\circ\text{C}$ 、7時間 Ni 拡散を行なった試料 (π 形) で測定した。抵抗率の温度

図2 Ni 添加 Si のバンド図

Fig. 2. Band diagram of Ni doped Si.

依存性をキャリア濃度の温度依存性に修正した結果を図1の π 形曲線に示す。これより $\Delta E_L = 0.23$ eV を得る。この値も徳丸氏⁽¹⁾、Ghandhi 氏ら⁽²⁾の結果と一致している。以上の実験結果より、本研究で用いる Ni 添加 Si のエネルギーバンド図を描くと図2のようになる。

DLTS 法によれば、注入された電子や正孔に対するトラップの捕獲断面積を求めることができる⁽⁷⁾。実験結果より算出した捕獲断面積は、電子に対し $\sigma_n = 1.1 \times 10^{-15} \text{cm}^2$ 、正孔に対し $\sigma_p = 5.6 \times 10^{-14} \text{cm}^2$ であった。しかし、図2で見るとトラップの捕獲断面積は、負の二価 (N_{A0}^{2-})、負の一価 (N_{A0}^{-}) に帯電した単位、および中性 (N_{A0}^0) の単位でそれぞれ異なる大きさを持っている。従って、DLTS法によって得られた上述の捕獲断面積の値は、これらのトラップの関与が合成された値となる。個々のトラップの捕獲断面積の値の決定については、より詳細な過渡応答の実験および解析が必要であるが、これに関しては別の機会にゆずることとする。

〈2・2〉ダイオード作製と電圧-電流特性 ショットキー形の整流接触をもつダイオードは、以下のようにして作製した。〈2・1〉節で得られた Ni 添加高抵抗 Si ウェーハの片面を CP_4 液にて化学的エッチングを行ない鏡面とし、真空度 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ Torr の下で Au を真空蒸着した。Au は仕事関数が比較的大きく⁽⁸⁾、本研究で用いる高抵抗 ν 形 Si に対しては良好な整流接触が得られた。Au のほかに Al, In などの金属を用いてみたが、Al は整流性を得るためには蒸着後加熱処理をする必要があり、この熱処理により Ni 添加バルクの抵抗率が変化してしまう傾向があった。また、In は仕事関数が Au に比べて小さいため整流性は悪く、いずれも本研究での電極材料としては不適当であった。ウェーハの他の面には Ni の無電解めっきを施しオーミック電極とし、これをスクライブして試料とした。

図3 ショットキー形ダイオードの
電圧-電流特性

Fig. 3. Current-voltage characteristics of a Schottky type diode.

以上のようにして作製されたダイオードの室温における電圧-電流特性を図3に示す。同図からわかるように、ダイオードの順方向特性 (Au 電極に正, Ni 電極に負バイアス印加) では比較的高い電圧領域までオーミックな電圧-電流特性を示し、その後 $I \propto V^{1.5}$ 程度のスーパーリニアな特性へと移行する。この特性は、低抵抗材料で作られた通常の金属-半導体接触ダイオードで見られるような、ショットキー障壁を越えるキャリアによる電流が支配的となっている指数関数的な特性とは異なり、Ni を添加したバルクの性質が伝導機構に寄与していることを示している。また、逆方向特性 (Au 電極に負, Ni 電極に正バイアス印加) では、オーミック特性の後、電流は飽和する傾向を示し、良好な整流接触が形成されていることを示している。

図3には、ダイオードと同じ断面積と厚さを持ち、整流接触を形成していないバルクのみを試料の電圧-電流特性も示してある。オーミック領域での抵抗の値は、ショットキー形ダイオードのほうが大きくなっていることがわかる。次章ではこの点に着目し、整流接触近傍に形成された高抵抗層を考慮したダイオードの伝導機構について検討を加えることにする。

3. 検 討

〈3.1〉 低電圧領域の電圧-電流特性 図3の電圧-電流特性の低電圧オーミック領域から求めた見かけの抵抗率は、 $3 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ であった。ここで言う見かけの抵抗率とは、オーミック領域から求めた抵抗値を試料長、断面積を用いて抵抗率に換算したものである。ダイオードを製作する前のバルクのみ抵抗率の値は、室温では図1より $1.7 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ であるので、ダイオードの見かけの抵抗率は、図3の試料の場合にはバルクのみより1.8倍ほど大きくなっていることになる。このような結果は、作製した試料の大部分についても得られた (著者らの一人も、半絶縁性 GaAs の p- ν 接合ダイオードにおいて、バルクのみより約8倍大きな見かけの抵抗率の値を得ている⁽⁹⁾)。このことは、ダイオードの整流接触あるいは接合近傍に、バルクの抵抗率よりも高い抵抗率を有する層が形成されることを示している。従って、低電圧オーム則の成立する範囲では、ダイオードは図4に示すような構造となっているものと考えられる。図中の ρ と ρ_0 はそれぞれ高抵抗層および残りのバルクの抵抗率で、 $\rho \gg \rho_0$ である。この素子の抵抗は近似的に次式となる。

$$R_1 = \rho(W/A) + \rho_0(L-W/A) \dots\dots\dots (1)$$

以下に、〈2.1〉節で得られた実験結果に基づいて、この高抵抗層の幅や抵抗率の値を求める。

〈3.2〉 高抵抗層の評価 著者らの一人は、Cr を添加した高抵抗 GaAs p⁺- ν 接合ダイオード (p⁺ は高濃度にドーパされた p 領域の意味) での伝導機構の解析で、接合近傍の高抵抗層が低電圧領域の電圧-電流特性を支配すると考えた⁽¹⁰⁾。すなわち、バルクが高抵抗になるほど p⁺- ν 接合の ν 領域側の空間電荷層はバルク側に広がり、そこでの抵抗率はバルクの抵抗率よりも大きく、系の取り得る最大の値 ρ_m を取ることが期待され、この領域が電圧-電流特性から求めた見かけの抵抗率を増加させていると考えた。著者らの一人が用いた試料は抵抗率が $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ と大きく、いわゆる Relaxation-case 半導体 (系の誘電緩和時間 τ_D が

図4 ダイオード構造

Fig. 4. Schematic structure of the diode.

図5 (a)ショットキー形ダイオードのバンド図と(b)空間電荷密度分布

Fig. 5. (a) Band diagram of a Schottky type diode, and (b) distribution of space charge density.

キャリアの寿命 τ_0 よりも十分に長いという条件を満たす) という特殊な条件を満たしている材料である ($\tau_D \ll \tau_0$ の場合を Lifetime-case 半導体と呼ぶ)。しかし, Relaxation-case 半導体の条件を必ずしも満足しなくても, 高抵抗半導体であればこのような空間電荷層の広がりが見られることは可能であり, しかも低電圧領域にのみ限定すれば, 本試料にもこの考えを適用することができるはずである。

本ダイオードはその作製法により, ショットキー障壁形ダイオードであるので, 実験結果に基づいてダイオードのバンド図を描くと図5(a)のようになる。ここで, Au の仕事関数 ϕ_m , Si に対する電子親和力 χ_s は, 既に報告されている値を用いた⁽⁸⁾。図5(a)において, 空乏層幅 W はバンドがフラットになる点とした。バンドが傾いている領域ではフェルミ準位と真性準位が交わる点近傍で抵抗が高く, その両側では抵抗が減少するので, バルクの導電率 σ_0 と等しい値を取る点が整流接触近傍にも存在するはずである。この点を $x=x^*$ と定め, また W と x^* の間に最小の導電率を示す点 x_m が存在すると考える。空乏層内の電荷密度は実際には $x=0$ から W まで連続的に変化するが, ここでは簡単化のため, 図5(b)のように x^*

を境界として空間電荷密度の方形近似を行なうことにする。すなわち, W_{d0} 内では最小の導電率を示す点 x_m における空間電荷密度 N_T^m , $0 \leq x \leq x^*$ では x が 0 および x^* での拡散電位の差の 1/2 の値を示す点 x_1 の空間密度 N_1 でそれぞれ一様であるとした。拡散電位の基準は $x=W$ にとった。

以上の条件の下でポアソン式を解き, 空乏層幅 W および x^* を求めると次式となる。

$$W = \frac{N_1 - N_T^m}{N_1} \sqrt{\frac{2\epsilon V_{dd}}{e N_T^m}} + \sqrt{\frac{2\epsilon \{V_{dd} N_T^m + (V_D - V_{dd}) N_1\}}{e N_1^2}} \quad (2)$$

$$x^* = W - \sqrt{\frac{2\epsilon V_{dd}}{e N_T^m}} = W - W_{d0} \quad (3)$$

ここで, V_{dd} および V_D : それぞれ $x=x^*$,

$x=0$ における拡散電位, ϵ : 誘電率

点 x_m における空間電荷密度 N_T^m は生成-再結合の解析より

$$N_T^m = \sum_i N_{Ti} \frac{e^{\frac{E_{Ti} - E_F}{kT}}}{\left(1 + e^{\frac{E_{Ti} - E_F}{kT}}\right)^*} * \left(\frac{e^{\frac{eV(x_m)}{kT}} - 1}{1 + e^{\frac{E_{Ti} - E_F + eV(x_m)}{kT}}} \right) \quad (4)$$

と与えられる。ここで, E_F はフェルミエネルギー, E_{Ti} はトラップが複数で存在する場合の i 番目のエネルギー値で, その単位密度が N_{Ti} である。 $V(x_m)$ は $x=x_m$ での拡散電位で

$$V(x_m) = (kT/2e) \ln(\mu_n n_0 / \mu_p p_0) \quad (5)$$

である。 V_{dd} は x^* の定義より $V_{dd} = 2V(x_m)$ となる。 $x=x_1$ における空間電荷密度 N_1 は $V(x_1) = V_{dd} + (V_D - V_{dd}/2)$ とおき, (4)式の $V(x_m)$ と置き換えることにより求められる。更に, トラップ濃度 N_T は図2より次式となる。

$$N_T = \frac{n_{00} - n_0}{1 + \left(1 + e^{\frac{E_{T2} - E_F}{kT}}\right)^{-1} + \left(1 + e^{\frac{E_F - E_{T1}}{kT}}\right)^{-1}} \quad (6)$$

ここで, n_{00}, n_0 : それぞれ Ni 原子添加前後のバルクの電子濃度

表1に示す本試料の室温における物理定数を用いて (2)~(6)式より W と x^* を計算すると, $W=7.6 \mu\text{m}$, $x^*=0.3 \mu\text{m}$ を得る。よって, この領域はほとん

表 1 室温 (298.5 K) における
Si 試料の物理定数

Table 1. Physical constant of Si sample
at room temperature (298.5 K).

記号	意 味	数 値
E_F	価電子帯上端からのフェルミエネルギー	0.64 eV
E_g	エネルギーギャップ	1.12 eV
N_c	伝導帯の有効状態密度	$3.2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
N_v	価電子帯の有効状態密度	$1.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
n_{00}	基板の自由電子濃度	$6.2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
n_0	ν 形バルクの自由電子濃度	$2.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
n_i	真性キャリア濃度	$8.3 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$
p_0	ν 形バルクの自由正孔濃度	$2.5 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$
ϵ_0	真空の誘電率	$8.85 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$
ϵ_s	比誘電率	12
μ_n	電子の移動度 ⁽¹⁾	$1,314 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
μ_p	正孔の移動度 ⁽¹⁾	$507 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$

ど Nr^m の空間電荷密度の領域で支配されると考えられる。図 3 より、ダイオードのオーミック領域から計算される抵抗 R_1 は $2.03 \times 10^4 \Omega$ であるから、この値と上で求めた W の値を (1) 式に代入し、 ρ を求めると $\rho = 4.6 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ を得る。一方、本試料の取り得る最大の抵抗率 ρ_m は

$$\rho_m = (2eV\mu_n n_p n_i)^{-1} \dots \dots \dots (7)$$

で与えられる (n_i は真性キャリア濃度) ので、これを計算すると $\rho_m = 4.6 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ となる。この値は先に求めた空乏層領域の抵抗率の値と一致する。

この結果の妥当性を確かめるための一つの手段として、基板の抵抗率が異なる Si に Ni を拡散し、前と同様の方法で作製したダイオードについても検討した。抵抗率 $425 \Omega \cdot \text{cm}$ ($n_{00} = 1.12 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) の n 形 Si に $1,100^\circ\text{C}$ 、7 時間の Ni 拡散を行なったバルクの抵抗率は $2.27 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ に増加した。これを用いて作製したダイオードの電圧-電流特性を図 6 に示す。先と同じようにして W および x^* を求めると、この試料の場合には $W = 58.5 \mu\text{m}$ 、 $x^* = 20.5 \mu\text{m}$ が得られる。これらの値は、前の試料のそれと比較してかなり大きくなっている。これは基板の抵抗率が前の試料のそれと比べ大きく、Ni 拡散後の抵抗率が 1 けた以上増加したための結果である。この W の値を (1) 式に代入し ρ を求めると、 $\rho = 4.4 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ が得られ、この値も先に計算した ρ_m の値とほとんど一致している。

以上の結果より、高抵抗半導体バルクより作製されたダイオードは、少なくとも低電圧領域では図 4 に示

図 6 ショットキー形ダイオードの
電圧-電流特性

Fig. 6. Current-voltage characteristics of
a Schottky type diode.

すような構造であり、高抵抗層の抵抗率は (7) 式で与えられる系の取り得る最大の値に支配されているものと考えられる。

〈2・1〉節の DLTS の結果より、電子に対する捕獲断面積 σ_n は $1.1 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ であった。図 2 より、電子のトラップとして寄与するのは NA_0^- および NA_0^0 であるので、電子の寿命 τ_n は、

$$\tau_n = \{ \langle \sigma_n v_{th} \rangle (NA_0^- + NA_0^0) \}^{-1} \dots \dots (8)$$

と与えられる。ここで、 v_{th} は電子の熱速度である。 NA_0^- および NA_0^0 を分布関数を用いて計算し、 $v_{th} = 10^7 \text{ cm/s}$ を用いると $\tau_n = 1.6 \times 10^{-6} \text{ s}$ を得る。一方、系の誘電緩和時間 τ_D は、系が ρ_m の状態にあり τ_D が最も長くなる場合を想定したとしても、 $\tau_D = \rho_m \epsilon = 4.9 \times 10^{-7} \text{ s}$ となる。従って、本実験で用いた試料では Relaxation-case 半導体の条件となる $\tau_D \gg \tau_n$ を満たしてはいない。しかし、その比率は約 1/3 程度であり通常の Lifetime-case 半導体 ($\tau_D \approx 10^{-12} \text{ s}$ 、 $\tau_0 \approx 10^{-6} \text{ s}$ 、すなわち $\tau_D \ll \tau_0$) とは区別されるべきものであろう。その一つの特徴の現われとして、上述した低電圧領域での電圧-電流特性の説明が、電極近傍の高抵抗領域を考慮することにより可能となる点を挙げることができる。

〈3・3〉 順方向高電圧領域 図3の順方向で、オーミック特性からずれた後の高電圧領域でのスーパーリニア特性における電流 I と電圧 V の関係はほぼ $I \propto V^{1.5}$ であり、本実験の範囲では高抵抗ダイオードで期待される空間電荷制限電流に支配されるような $I \propto V^2$ 特性は観測されなかった。 $I \propto V^{1.5}$ の依存性に関する機構については現在のところ明らかではないが、高バイアスでスーパーリニア特性を示すのは、正電極からの正孔のバルク中への導入が考えられ、それが高抵抗層 W を通過できたときにスーパーリニアな特性へと移行するものと考えられる。図3を例にとって考えると、オーム則からスーパーリニア特性へと移る電圧 V_T を 100 mV とし、この電圧で正孔が W なる距離を寿命 τ_p で通過できるものとすれば、 τ_p は次式で計算できる。

$$\tau_p = W^2 / \mu_p V_T = 1.1 \times 10^{-8} (\text{s}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 W は 7.6 μm である。DLTS の結果より、正孔の捕獲断面積 σ_p は $5.6 \times 10^{-14} \text{cm}^2$ であった。よって、正孔の寿命は $\tau_p = (\langle \sigma_p v_{th} \rangle N_T)^{-1} = 3.1 \times 10^{-8} \text{s}$ となる。この値は先に求めた τ_p の値とほぼ一致する。従って、正孔の寿命 τ_p に対しては ν 形バルクの誘電緩和時間 τ_D は、 $\tau_D > \tau_p$ を満たすことになる。このことから、本研究では取上げなかったが、もし p - ν 接合構造のダイオードが作製されれば、少数キャリア注入に基づく Relaxation-case 半導体に類似した伝導機構の議論が可能となる。

一般に、深い不純物準位を添加した ν 形バルクに B 原子のような p 形不純物を熱拡散法により導入し、 p - ν 接合ダイオードを作製することは可能である。本研究でもこの方法で p - ν 接合の形成を試みたが、Ni 添加 Si バルクでは、接合形成時に行なう熱酸化や B 拡散による熱処理過程で Si 中に導入された Ni 原子が再び外部に出てしまい、バルクの抵抗を低下させると思われるような効果が生じ、高抵抗の Si p - ν 接合ダイオードを作製することが困難であった。この点については現在、接合形成方法を改良する方向で検討を加えている。

4. む す び

深い不純物準位として、Ni 原子を添加した高抵抗 Si の電気的特性が調べられた。抵抗率の温度依存性

の実験および DLTS 法により、本研究で用いた試料の Ni 原子による二つのアクセプ準位の活性化エネルギーの値が確認された。伝導帯に近い準位の位置は、伝導帯下端より $0.42 \pm 0.01 \text{ eV}$ であり、Chiavarotti 氏らの結果と一致した。他の一つは価電子帯上端より 0.23 eV の位置にあり、徳丸氏らの報告と一致した。

ショットキー形接触構造のダイオードを作製し、電圧-電流特性が調べられた。その結果、低電圧領域ではバルクのみから得られる抵抗より大きい抵抗をもったオーミック特性が得られた。整流接触近傍の高抵抗空間電荷領域を考慮することにより、その特性をかなり良く説明することができた。

本研究を行なうにあたり、日ごろ御激励いただいている本学電子工学科 佐方利道主任教授に深く感謝いたします。また、本研究に関し多くの御助言をいただきました電子技術総合研究所 徳丸洋三氏および本学通信工学科 白石 正助教授にお礼申し上げます。実験に協力いただいた本学電子工学科 小林一雄、長野圭三、榎波克哉、長谷部生男、鈴木 崇、甲木裕久、岸本 浩君の各氏に感謝します。

(昭和 57 年 11 月 1 日受付、同 58 年 6 月 18 日再受付)

文 献

- (1) Y. Tokumaru: "Properties of Silicon Doped with Nickel", *Japan J. Appl. Phys.*, **2**, 542 (1963)
- (2) S. K. Ghandhi & F. L. Thiel: "The Properties of Nickel in Silicon", *Proc. IEEE*, **57**, 1484 (1969)
- (3) W. B. Chua & K. Rose: "Electrical Properties of High-Resistivity Nickel-Doped Silicon", *J. Appl. Phys.*, **41**, 2644 (1970)
- (4) G. P. Chiavarotti & M. Conti: "Characterization of Properties of Nickel in Silicon Using Thermally Stimulated Capacitance Method", *Solid State Electronics*, **20**, 907 (1977)
- (5) 桑野: 「Ni 拡散 Si ダイオードにおける二重注入電流-電圧特性」, 信学論, **58-C**, 732 (昭 50-12)
- (6) 例えば, M. A. Lampert & P. Mark: *Current Injection in Solid* (1970) Academic Press
- (7) Y. Tokumaru & H. Okushi: "DLTS Measurement on Au-Doped Si p^+ - n Junctions and Its Computer Simulation", *Japan J. Appl. Phys.*, **19**, 2411 (1980)
- (8) S. M. Sze: *Physics of Semiconductor Devices*, p. 363 (1969) John Wiley and Sons
- (9) H. Okushi: "Carrier Transport in p^+ - ν Junction Based on Relaxation Semiconductor, Experiments", *Japan J. Appl. Phys.*, **18**, 791 (1979)
- (10) H. Okushi: "Carrier Transport in p^+ - ν Junction Based on Relaxation Semiconductor, Theory", *ibid.*, **18**, 779 (1979)