KrFエキシマレーザドーピングによる N型GaAsへの自己整合的銅薄膜の堆積

正員 豊田浩一 (理化学研究所)

正員 杉岡幸次 (理化学研究所)

Self-Aligned Deposition of Copper Thin Films on N-Type Gallium Arsenide
Using KrF Excimer Laser Doping of Si
Koichi Toyoda, Member, Koji Sugioka, Member
(The Institute of Physical and Chemical Research,RIKEN)

Metallic thin films are widely used in microelectronics devices such as inter-connections of electric circuit and electrodes of the devices. As a novel process of spatial selective deposition of the metal thin film, self-aligned deposition of copper thin films with combination of krypton fluoride excimer laser doping and succeeding electroplating has been demonstrated. The N-plus layer of N type gallium arsenide is formed with the incorporation of high concentration silicon atoms using the reduction-projection laser doping system. In the electroplating process, high-contrast selective depositions of copper thin films have been obtained. The contrast ratio of selective deposition is estimated to exceed 10^7 , calculated as the ratio of the current densities on the doped and undoped semiconductor surfaces. The contact between the deposited copper thin film and gallium arsenide has revealed ohmic characteristics. The specific contact resistance is estimated to be $2.32 \times 10^{-5} \text{ ohm-cm}^2$, which is about 1/30 as small as that of the conventional alloyed ohmic contacts.

キーワード：自己整合、銅薄膜、オーミック特性、接触抵抗

1. まえがき

電子デバイスの発展につれ、従来の金属薄膜形成に代わる新しい、空間選択性を有した、薄膜形成法が求められる。本論文では、N型GaAsに、エキシマレーザドーピングによって、不純物としてSi添加したとき、引き続き電気メッキ工程において、ドーピング領域に高い空間選択性を有するCu薄膜の堆積に関する実験的研究について述べる。この空間選択性は、従来のフォトリソ等によってパターンを決定するのではなく、レーザドーピング領域にのみ選択的堆積を行うものであるから、自己整合的(self-alignment)という⁽¹⁾。更に、空間選択性は、電気メッキ時の基板表面での電流分布の不均一性によるとの仮定から、ドーピング領域とドーピングされていない領域との堆積率のコントラスト比を算出した。

エキシマレーザは、発振波長が紫外域に有り、かつ、発振のパルス幅がナノ秒と短いため、GaAs基板に照射したとき光の侵入長が極めて小さく、基板加熱は瞬間的であり照射領域に限定される。ここでは、エキシマレーザのレーザフルーエンス(単位面積当たりのレーザパルスエネルギー)を適当に設定し、照射損傷を避けると共に、複数回数レーザ光を照射してレーザドーピングを行った。

エキシマレーザドーピングは、この瞬間加熱を利用し、また原料ガスとして用いた SiH_4 ガスの熱化学分解によって生じたSi原子を加熱領域に拡散させるものである⁽²⁾。レーザドーピングには、5分の1縮小投影ドーピング装置が用いられた。投影線幅が数ミクロン程度と小となると、実測されるドーピング線幅は投影線幅に比して、線幅が縮小する⁽³⁾。これは、レーザ加熱による融解領域にのみSiが拡散するというモデルと一致する。事実、ドーピング線幅は、2次元熱拡散方程式で得られる表面温度がGaAsの融点を越す線幅とよく一致した⁽⁴⁾。

レーザドーピング領域は、不純物濃度が固溶限界に達することが知られ⁽⁵⁾、キャリア濃度も表面から、深さ、 170 nm まで $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ という高い値が報告されている⁽⁶⁾。このような高い表面濃度の半導体は金属や電解液との接触においてオーミック特性を示す、この仮説はコントラスト比の算出において用いたが、実際に微小な電極を作製しその電流-電圧特性から、 $23.2 \mu\Omega\text{-cm}^2$ と低い比接触抵抗を得た⁽⁷⁾。これは合金法で作製したオーミック接触に対し、約30分の1という低い値である。

Cuは、近年、Alに比べ、導電性、エレクトロマイグレーション臨界電流などが高いので注目される。

2. 実験方法

試料基板としては n-Si ドープ N 型 GaAs (HB) (100) 基板 (キャリア濃度, $2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) を用いた。Si 不純物添加のため He 希釈 SiH_4 ガスを用い、その圧力は、100 Torr とした。試料基板には、レーザドーピングに引き続いて電気メッキを行うため、予め裏面に合金法によりオーミック電極が形成された。これは Au-Ge-Ni-Sb 合金を真空蒸着法により蒸着し、 400°C 、2 分間加熱して合金化処理を行った。KrF エキシマレーザ (発振波長 248 nm, Lambda Physik 社製) は、パルス幅約 23 ns である。

図 1 に実験装置の概略、実験手順および作製された試料断面を模式的に示す。図 1 (a) はレーザドーピングを示す。縮小投影レンズを用いてレチクルの線状パターンを通過した KrF エキシマレーザ光を、He 希釈 SiH_4 ガス 100 Torr を封入したガスセル中においた GaAs 試料基板に投影し、線状に Si 不純物添加を行う。投影レンズは、NA: 0.25、縮小率: 1/5 である。レーザ光照射条件としては、最適条件として試料表面でのレーザフルーエンス、 380 mJ/cm^2 、照射回数、10 回とした。

図 1 実験装置と試料断面の模式図

- (a) 縮小投影装置による直接ドーピング
- (b) 銅の電気メッキ
- (c) 自己整合的堆積したサンプルの断面

Fig.1 Illustrations of experimental apparatus

- (a) Reduction-projection KrF excimer laser doping
- (b) Electroplating of copper
- (c) Cross-section of selective deposition.

図 1 (b) は電気メッキを示す。レーザドーピングされた GaAs 基板を 0.8 wt % 硫酸銅水溶液に浸漬し、白金陽極と試料の間に直流電圧を印加した。試料面での電流密度を $2-10 \text{ mA/cm}^2$ 、また、メッキ時間を 60 s から 150 s まで変化して堆積膜厚を測定した。更に、電流密度と Cu 薄膜の電気抵抗との関係、走査型電子顕微鏡による微視的 surface 観察などの評価を行った。図 1 (c) はこのようにして得られた選択的 Cu 薄膜を堆積した試料の断面を模式的に示したものである。Cu 薄膜がレーザドーピング領域にのみ選択的に堆積することを示している。

3. 選択的堆積のコントラスト比

電気メッキにおける金属の堆積は、ファラデーの電気分解の法則による。従って、堆積膜厚は、表面の電流密度に比例する。部分的に高濃度に不純物添加した試料を電解液に浸し、直流電圧を印加すると、電解液に対してオーミックであるか否かによって電流密度が変わる。コントラスト比は、この両電流の比として求められた。

〈3.1〉ドーピング領域の電流密度 レーザドーピングによって低抵抗の N プラス層が表面に形成された領域では、比抵抗が小さく、かつ、その厚さが小であるのでウェーハ断面での電位分布を考えると、ほぼ、すべての電圧が基板に印加されるとしてよい。すなわち、試料の両面に印加される電圧を V_0 とし、ドーピング層の電圧を V_a 、基板にかかる電圧を V_b ($V_0 = V_a + V_b$) とすると、 $V_a \ll V_b$ である。従って、近似的に $V_b = V_0$ と置くことが出来る。ドーピング領域の電流密度、 I_d はオームの法則から次式のようになる。

$$I_d = q n_D \mu V_0 / d \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 n_D は不純物濃度、 q は電子電荷、 μ は移動度、 d はウェーハ厚さである。

〈3.2〉非ドーピング領域の電流密度 N 型半導体金属との接触は、ショットキダイオード特性となる。非ドーピング領域において仮想的な銅薄膜の堆積を仮定し、同様な電流-電圧特性が適用されるとする。電流密度が小なとき、ほぼすべての電圧は半導体表面に印加されるとしてよい。すなわち、表面部分にかかる電圧を V_s 、基板にかかる電圧を V_b ($V_0 = V_s + V_b$) とすると、 $V_s \gg V_b$ である。従って、近似的に $V_s = V_0$ と置くことができる。熱電子放出モデルによると⁽⁸⁾、

$$I_s = (4 \pi q m_e^* k_B^2 T^2 / h^3) \cdot \exp(-q \phi_B / k_B T) \cdot \{ \exp(q V_0 / k_B T) - 1 \} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 m_e^* は有効質量、 $q \phi_B$ は金属-半導体接触の障壁値、 k_B はボルツマン定数、 T は温度 (K) である

(2) 式において、伝導帯の有効状態密度 $N_c = 2 (2 \pi m_e^* k_B T)^{3/2} / h^3$ 、電子の熱的速度 $v_{th} = (3 k_B T / m_e^*)^{1/2}$ とおく。また、実験条件では、 V_0 は 1 mV 程度であり、常温においては $V_0 \ll k_B T / q$ と近似できる。この近似を用いれば (2) 式は次のようになる。

$$I_s = (6\pi)^{-1.2} q N_c v_{th} \cdot \exp(-q\phi_B/k_B T) \cdot (qV_0/k_B T) \dots (3)$$

〈3.3〉コントラスト比 一定時間通電した時の堆積膜厚は電流密度に比例する。したがって、ドーピング領域と非ドーピング領域の堆積膜厚の比、つまりコントラスト比 r は、(1) 式および (3) 式の電流密度の比で与えられる。

$$r = I_d / I_s = [(6\pi)^{-1.2} \mu (k_B T / q) n_D / (dN_c v_{th})] \cdot \exp(q\phi_B / k_B T) \dots (4)$$

(4) 式はまた、拡散係数を D とし、アイシュタインの関係式 $D = \mu k_B T / q$ を用いると次式のように書くことができる。

$$r = [(6\pi)^{-1.2} D n_D / (dN_c v_{th})] \cdot \exp(q\phi_B / k_B T) \dots (5)$$

(5) 式において [] 内は半導体基板に関したパラメーターで決定される。それに対して、指数関数項は金属-半導体接触の障壁値で決定される。障壁値は銅に対してそれぞれ Si では 0.66 eV, Ge では 0.48 eV, GaAs では 0.82 eV が知られている⁽⁹⁾。

〈3.4〉Si, Ge, GaAs のコントラスト比の比較 表1は(4)式を用いて、代表的な半導体である Si, Ge, GaAs について基板の不純物濃度、 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ に対して温度 300 K のコントラスト比を計算した結果である。計算には、それぞれの半導体について有効質量の相違、および電子の移動度について基板の不純物濃度による変化を考慮した⁽¹⁰⁾。

表1において、GaAs については、基板不純物濃度が $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の場合、 7.9×10^9 という大きい値が得られる。Si についても、 10^5 程度の値となる。Ge に関してはそのような大きな値は得られなかった。したがって、選択的金属薄膜堆積は理論的には、GaAs および Si において特徴的に現われると結論できる。

表1 種々の半導体に対する選択的金属堆積のコントラスト比と基板不純物濃度との関係 (計算値)

Table 1 Calculated contrast ratio for selective metal deposition for various impurity concentrations.

半導体の種類	作業温度 (K)	基板不純物濃度 (cm^{-3})		
		1×10^{16}	1×10^{17}	1×10^{18}
Si	300	2.6×10^4	1.7×10^5	6.0×10^5
Ge	300	35	290	1770
GaAs	300	1.1×10^9	7.9×10^9	5.4×10^{10}

4. 実験結果

〈4.1〉KrFエキシマレーザーによる直接ドーピング 図2は、線幅約 $1.63 \mu\text{m}$ のドーピング領域の走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真である。レーザードーピングは、レーザー照射部位にのみ不純物添加がなされる、いわゆる局所的処理である。そのため、従来のフォトリソトを使用する2段階プロセスとは違ってレジストを使用しないで、パターンが形成できる直接法として注目される。

縮小投影のマスクとして線幅 $15 \mu\text{m}$ のクロムマスクを使用し、試料表面では5分の1に縮小され線幅 $3 \mu\text{m}$ となる。レーザー光照射は繰り返し速さ 1 Hz で 10 回行った。SiH₄ ガス圧は、100 Torr である。

ドーピング線幅を求めるため、N型GaAsの代わりに、半絶縁性GaAs (比抵抗、 $1 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$) を用いた。直接レーザードーピングを行った後、40 HF + 1 H₂O₂ + 4 H₂O 溶液中、光照射の下で 50 s 間、選択エッチングした。これにより、非ドーピング領域が食刻されドーピング領域がレリーフとして残るので、線幅観測が容易になる。

図2 GaAs への直接レーザードーピングのSEM写真 (照射線幅: $3 \mu\text{m}$, ドーピング線幅: $1.63 \mu\text{m}$)

Fig.2 SEM photograph of laser direct doping of GaAs, projected linewidth: $3 \mu\text{m}$, observed linewidth: $1.63 \mu\text{m}$.

観察された平均線幅は、 $1.63 \mu\text{m}$ である。投影される照射線幅 $3 \mu\text{m}$ に対して線幅の縮小が起きるのは、レーザー光照射による温度分布が一樣でないためである。表面温度を計算しその温度がGaAsの融点を越える部分にレーザードーピングがなされるという仮説を用いて線幅を求めると、 $2.12 \mu\text{m}$ となる。この場合、観測値は計算値より $0.49 \mu\text{m}$ だけ小となる。その理由は、ドーピング領域の両側の部分が不純物濃度が中心部程高くないため、選択エッチングの際、両側の部分がある程度食刻され、実際よりも線幅が小さく観測されるためと考えられる。〈4.5〉節において、照射線幅 $4 \mu\text{m}$ の場合が示されるが、この仮説に基づく計算値が妥当であることが示される。

〈4.2〉Cu膜厚と電流密度との関係 図3は、試料面積 $5 \times 5 \text{ mm}$ のGaAs全面にレーザードーピングを行い、電流密度の関数として膜厚を示す。レーザーフルエンス $380 \text{ mJ} / \text{cm}^2$ 、メッキ時間 60 s の時の膜厚変化である。膜厚は電流密度と共に比例的に増加することがわかる。

図3 銅薄膜の厚さと電流密度との関係
Fig.3 Relationship between film thickness of Cu and current density.

図4 電流密度と比抵抗
Fig.4 Resistivity of Cu thin film as a function of current density.

〈4.3〉Cu 薄膜の比抵抗 図4は、堆積した薄膜の比抵抗を4探針法により測定し、メッキ時の電流密度の関数として示したものである。比抵抗は、電流密度とともに非線形的に増加する。これは、〈4.4〉節で述べる薄膜の微視的構造と関係する。得られた最小比抵抗は電流密度2.1mA/cm²の時、2.45μΩ-cmである。この値は、真空蒸着膜の2.70μΩ-cmよりは小であるが、バルクの値1.72μΩ-cmよりはわずかに大きい。

〈4.4〉銅薄膜の微視的構造 図5は堆積膜の表面を走査型電子顕微鏡（SEM）で観察したものである。電流密度2.1mA/cm²では微粒子径、100nm-200nmに対して、10.6mA/cm²では粒径は300-500nmと増大している。図4の比抵抗との関連で考えると、電流密度が小で、従って、粒径の小なるとき低い比抵抗値を示すことが分かる。

図5 種々の電流密度の銅表面の走査型電子顕微鏡写真
Fig.5 SEM photographs of Cu surfaces for various current densities.

〈4.5〉膜厚と線幅 図6はメッキ電流0.2mAと一定に保ち、メッキ時間を60sから150sまで変化し、メッキ時間の関数として膜厚および線幅を求めた。まず、堆積膜厚と線幅の関係を考える。膜堆積率は約4nm/sである。線幅の増加率は約9.3nm/sであり、膜堆積率の約2倍となる。これにより、膜の堆積はほぼ等方的に起き膜厚の2倍だけ線幅の増加を生じるとされる。

次に、線幅について考える。この実験では、線幅20μmのクロウマスクを使用した。従って、投影線幅は4μmとなる。〈4.1〉節においてドーピング線幅は表面温度がGaAsの融点を超える線幅を採用するのが適当と考えた。この場合、この仮定に基づく計算値は2.9μmである。実際、図6において時間ゼロに外挿して得られる線幅は2.92μmであり、よく計算値に一致する。従って、ドーピング線幅はこの仮説によって与えられるとしてよいことが分かる。

〈4. 6〉接触抵抗 図7は、2個の電極間の抵抗をコンタクト間距離の関数として示したものである。自己整

図6 メッキ時間と膜厚、線幅の関係
Fig.6 Relationship between plating time and film thickness and linewidth.

図7 Cu電極パッド間の抵抗と距離の関係
作成条件：レーザードーピング時のレーザーフラエンス：
380 mJ/cm²、パルス数：10、ガス圧：100 Torr、
メッキ電流：0.2 mA、メッキ時間：
60 秒。

Fig.7 Pair resistance of Cu pads as a function of electrode distance. Laser fluence: 380 mJ/cm², Laser pulse: 10, Gas pressure: 100 Torr, Plating current: 0.2 mA, Plating time: 60 s.

合的薄膜形成は半導体-金属のコンタクトとして興味がある。直径300 μmのマスキパターンを用い、それを5分の1に縮小投影して作成した間隔180 μm毎に規則的に整列した直径60 μmのCu薄膜のパッドについて2個のパッド間の抵抗を測定した。この場合、作製後のアニール、合金化などの熱処理は加えていない。この電流-電圧特性はほとんど直線的であり、良好なオーミック接触であることが分かった。

(1) 比接触抵抗 図7において電極間距離をゼロに外挿したとき、半導体-金属接触抵抗0.82 Ωを与える。他の方法で作成された接触抵抗と比較の便宜上、電極面積で規格化した比接触抵抗を求めると、 $2.32 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}^2$ を得る。

(2) 合金型接触との比較 自己整合的薄膜形成により作成したCu-GaAsオーミック接触は非合金型である。それに対し、2節で述べたと同様な方法で作成した合金型オーミック接触の比接触抵抗 $7.49 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}^2$ であった。これと比較すると非合金型の比接触抵抗は、約30分の1の値であることが分かる。従って、この方法は熱処理が不要で且つ、低い抵抗値が得られることが分かる。

5. 検討および考察

〈5. 1〉コントラスト比 コントラスト比の計算により、自己整合的金属薄膜の堆積はGaAsに対して顕著であることが示された。これは実験的に観測された高い選択性と矛盾しない結果である。

実験では、非ドーピング領域にはCu薄膜堆積は観測されなかった。その場合、GaAs基板は直接溶液に接触することとなり、仮定した金属-半導体接触とは状況が異なる。KClなどの電解質溶液に浸漬したGaAsにおいて、表面準位の影響はあるものの、溶液-半導体接触のショットキダイオード特性が確認されている⁽¹¹⁾。表面準位が存在するAu-GaAsについてゼロバイアス障壁値 $\phi_B^0 = 0.66 \text{ eV}$ が報告されている⁽¹²⁾。この値を用いるとコントラスト比 $r = 2.3 \times 10^7$ となる。このように障壁値によってコントラスト比は変化するが、その場合においても $r \gg 1$ である。これはフォトリソを用いずにパターンを形成するのに十分なコントラスト比である。

なお、レーザードーピングによるキャリア濃度に匹敵する高い不純物濃度、あるいは反対に半絶縁性の基板などでは〈3. 2〉で行った仮定が成立しない場合もある。

次に、(3)式において $V_0 \ll k_B T/q$ なる仮定を行った。用いたGaAsはウェーハ厚さ $d = 0.5 \text{ mm}$ 、比抵抗 $\rho = 7 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ である。電流密度 $i = 10 \text{ mA/cm}^2$ においてウェーハ両面に印加される電圧 $V = \rho i d = 0.0035 \text{ mV}$ となる。室温付近では $k_B T/q = 25 \text{ mV}$ であるから、 $V_0/(k_B T/q) = 1.4 \times 10^{-4}$ となり、この仮定が成り立つことが知れる。

〈5. 2〉微細加工 自己整合性は微細加工の観点から重要である。電極や配線形成は、通常の製作過程では、膜形成とパターン形成の組み合わせによるものである。しかし、イオン注入による不純物注入においてMOSFETのゲートをマスクとしてソース、ドレイン部分をゲートの

位置と自動的に合わせる自己整合プロセスが知られ、その有効性が指摘されている⁽¹³⁾。これによって、マスクの数を減らしたり、位置合わせの累積誤差を少なくすることが出来るとされる。金属薄膜が自己整合によって堆積されるならば同様な効果が期待される。直接レーザドーピングではすでに、0.3 μm までの線幅が得られたという報告がある⁽³⁾のでさらに微細な構造に適用できることが予想される。ここで述べた方法では、膜厚の2倍だけの線幅の増加があるので、微細寸法の制限はあるが、同程度の線幅に適用することは可能であると考えられる。

Si デバイスの配線材料としては、現在は Al 合金などが、主として用いられる。しかし、将来は、Al 合金に代わって Cu が有望とされる。すなわち、Al 合金の比抵抗は3-3.5 $\mu\Omega\text{-cm}$ であり、デバイスの微小化に伴い、高速化に必要な比抵抗の点、更には、エレクトロマイグレーションに関連した信頼性でも、Al 合金よりも Cu 配線が望ましいとの指摘されている⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

ここで述べた自己整合的銅薄膜形成法は、Si 基板に対しても理論上高いコントラスト比を示すことから、Si デバイスについても適用できると考えられる。

6. 結論

KrF エキシマレーザによる直接レーザドーピングにより、N 型 GaAs に対して Si 不純物添加を行い、引き続き電気メッキにおいて、自己整合的薄膜形成を行った。膜形成はレーザドーピング領域にのみ選択的になされた。理論的考察ではそのコントラスト比 $r \gg 1$ である。堆積した Cu 薄膜の比抵抗の測定、表面顕微鏡観察などによって良好な薄膜が自己整合的に形成されることを明らかにした。半導体との接触はオーミックであり、比接触抵抗として、23.2 $\mu\Omega\text{-cm}^2$ が得られた。この値は、合金により作成した接触の約30分の1という低い値である。微細寸法の加工法としては、0.3 μm 程度の微細線に適用できる可能性を有するものである。さらに、オーミック接触の低温形成という観点から、非合金法として意義がある。

(平成6年11月18日受付、同7年3月9日再受付)

文献

- (1) K. Sugioka and K. Toyoda : "Selective metallization of n-type GaAs formed by projection-patterned excimer laser doping of Si", Appl.Phys.Lett. 55, No. 7, 619-621 (1989-8)
- (2) K. Sugioka and K. Toyoda : "Influence of laser fluence and dopant gas pressure on properties of photochemical doping of Si into GaAs using XeCl excimer laser", Appl. Phys. A45, 189-192 (1988)
- (3) K. Sugioka and K. Toyoda : "Submicron patterned doping of GaAs using a thin solid dopant source by transient excimer laser melting", J.Vac.Sci. Technol. B6, 3 850-852 (1988-5).
- (4) K.Sugioka and K.Toyoda:"Direct formation of three-dimensional structure in GaAs by excimer laser doping", Japan. J.Appl.Phys. 28, No.10, 2162-2166 (1989-10)
- (5) T. F. Deutsch, J. C. C. Fan, G. W. Turner, R. L. Chapman, D. J. Ehrlich and R. M. Osgood, Jr. : "Efficient Si solar cell by laser photo- chemical doping", Appl.Phys.Lett. 38, No.3, 144 (1981-2)
- (6) K. Sugioka and K. Toyoda : "Generation of carrier concentration as high as $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ in GaAs by Si doping using a KrF excimer laser", Appl. Phys. Lett. 61, No.23, 2817-2819 (1992-12)
- (7) K. Sugioka and K. Toyoda : "Properties of Cu thin films formed selectively on n-GaAs by projection patterned laser doping", Vacuum 41, 4-6, 1258-1260 (1990)
- (8) 石原 宏: 半導体デバイス工学 (コロナ社) p. 58 (1993-6-30)
- (9) 応用物理学会編: 「応用物理ハンドブック」 (丸善) p. 485 (平成6-9-30)
- (10) S.N.Sze: "Physics of Semiconductor Devices", John Wiley & Sons, Inc. (New York) (1981)
- (11) M. Somogyi: "Impedance of GaAs-GaAsP- and GaP-electrolyte interfaces in the 10kHz-100kHz frequency range", Crystal Properties & Preparation (E.Lendvay ed.) 12, 347-352 (1987)
- (12) K. Maeda: "Current-voltage characteristics and interface state density of GaAs Schottky barrier", Appl.Phys.Lett., 62, 2560-2562 (1993-5-17)
- (13) 徳山 巍: 「MOSLSI 製造技術」 日経マクロウヒル社, 徳山 巍, 橋本哲一 編著, p. 217 (昭60-6)
- (14) T. Ohmi : "Advanced copper metallization technology for ULSI interconnects", Solid State Technol. (Penn Well Pub. Co.) Vol.35, No.4, p.47-p.52 (1992-4)
- (15) C.V.Thompson and J.R.Lloyd: "Electromigration and IC Interconnects", MRS Bulletin, Vol.18, No.12, p.19-p.25 (1993-12)
- (16) Y. Arita, N. Awaya, K. Ohno and M. Sato: "Copper Metallization Technology for Deep Submicron ULSIs", MRS Bulletin, Vol.19, No.8, p.68-p.74 (1994-8)

豊田 浩一

(正員) 59年大阪大学工学部電気工学科卒業。68年理化学研究所入所。紫外レーザの開発とレーザプロセスの研究に従事。元光・量子デバイス技術委員長。応用物理学会、物理学会、レーザー学会会員。工博。

杉岡 幸次

(正員) 84年早稲田大学理工学部電子通信科卒業。86年同理工学研究科修士課程修了。86年、理化学研究所入所。エキシマレーザを用いる半導体微細加工、金属の傾斜機能構造の形成の研究に従事。応用物理学会、レーザー学会会員。工博。