富山大学教育学部紀要Ｂ（理科系）No.45：23－32（平成六年）

四探針法の抵抗率補正係数

山　下　正　人

(1994年４月５日受理)

Resistivity Correction Factor for the Four-Point Probe Method

Masato YAMASHITA

キーワード：四探針法，抵抗率，補正係数，ポアソン方程式，ラプラス方程式，境界値問題

Key words : four-point probe method, resistivity, correction factor, Poisson equation, Laplace equation, boundary-value problem

１．まえがき

抵抗率は数多い物理量の中でも最も基本的なものの一つと言えよう。抵抗は試料の形状に依存するので，たとえ同じ抵抗率をもつ材料であっても，形状が異なれば抵抗も異なる。したがって，材料を研究したり開発したりする際には，抵抗ではなく材料固有の特性を反映する抵抗率が用いられる。

Fig. １に示されるように直方体の試料の両端面に電極を取り付け，その間に電流Iを流した場合を考えよう。電極間で測られる電位差をV［V(ボルト)］とすると，VとIの関係は次のようになる。

$$V = R I \qquad \cdots (1)$$

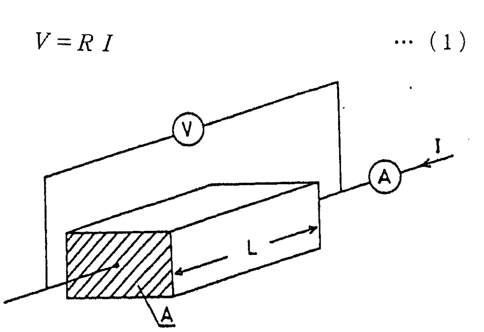

Fig. 1　試料の両端で電圧を測定する抵抗率測定法。Lは試料の長さ，Aは断面積である。

ここでRは電極間の抵抗であり，単位はΩ（オーム）である。

ところで抵抗Rは試料の断面積A［cm²］と長さL［cm］を用いて

$$R = \rho \frac{L}{A} \qquad \cdots (2)$$

と表される。ここでρは抵抗率で，単位はΩ－cmである。したがって，式（1）と（2）から抵抗率ρは次のようになる。

$$\rho = \frac{A}{L} \cdot \frac{V}{I} \qquad \cdots (3)$$

ここでA/Lは，試料が有限であることに起因する電位分布のひずみを補正する係数（抵抗率補正係数）に対応する。

式（3）の右辺にある電位差Vについてもう少し考えてみよう。Vは電力が流れることによって生ずる電圧降下である。いま簡単のために電極は金属でできており，ここでの電圧降下は極めて小さいとして無視する。その結果，電位差Vは試料本体の電圧降下V_1と，電極と試料との接触部分で生ずる電圧降下V_2との和になる。そこでV_1とV_2を使って式（3）を書き直すと次のようになる。

$$\rho = \frac{A}{L} \cdot \frac{V_1}{I} + 2\,\frac{A}{L} \cdot \frac{V_2}{I} \qquad \cdots (4)$$

式（4）の右辺第二項にある係数2は，電極と試料との接触部分が二つあるからである。われわれが実際に必要とするのは試料の抵抗率であるが，式（4）から求められる抵抗率には電極と試料との接触部分の抵抗（接触抵抗）に起因する抵抗率も含まれることになる。電極と試料とが結晶学的に連続とみなせる場合は別として，通常この部分の抵抗率は決して小さいものではなく，無視するわけにはいかない。

Fig. 1の測定法では必然的に接触抵抗の影響が入ってくるが，この欠点を改良するために考えられた方法がFig. 2に示されている。この方法は，試料に四本の針状電極（探針）をたてることから四探針法と呼ばれている。測定する際には通常外側の二本の探針AとDの間に電流 I を流し，内側の二本の探針BとCの間に生ずる電位差 V を測定する。この方法では探針Bや探針Cには電流がほとんど流れない。したがって，電極と試料との接触抵抗による電圧降下は無視してもよいので，試料の抵抗率を正確に求めることができる。また，この方法は四本の探針を自由に動かすことができるので，抵抗率の分布を測定することもできるし，探針の間隔も狭くして電流のひろがりを小さくしてやれば，局所的な抵抗率を求めこともできる。

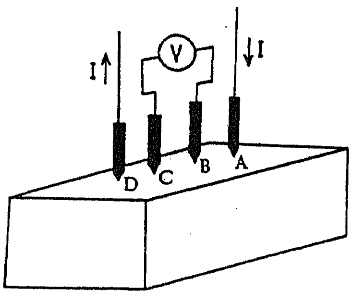

Fig. 2　抵抗率の四探針法による測定。探針Aから探針Dに向かって電流を流し，探針Bと探針Cの間の電位差を測定する。

四探針法は，抵抗率の測定法として現在最も新頼のおける方法である。事実ASTM（American Society for Testing and Materials）規格[1]やDIN（Deutshes Institut für Normung）規格[2]やJIS（Japanese Industrial Standard）規格[3]では，シリコンウェハの抵抗率を測定する方法として四探針法が規格化されている。

四探針法によって抵抗率を求めるためには，試料の形状や探針の位置を正確に取り込んだ抵抗率補正係数を用いることが大切である。抵抗率補正係数の理論的・実験的研究もすでにかなり行われている。[4-16] 四探針法では，電流を流す探針は四本のうちいずれかの二本であるから，その選び方は六通りある。通常はFig. 2のような場合が多いが，探針Aと探針Cの間に電流を流し，探針Bと探針Dの間に生ずる電位差を測定する方が，Fig. 2の方法に較べて探針間隔の不均一に起因する誤差が軽減されるという報告がある。[17] この論文では後者の方法で抵抗率を測定する際に必要な抵抗率補正係数を理論的に導き，測定系のパラメータと抵抗率補正係数の関係を表示する。

2．抵抗率補正係数 F の導出

Fig. 3は，直方体試料と四探針からなる測定系の概略図である。この解析では探針Aから探針Cに向かって電流 I を流し，探針Bと探針Dの間の電位差 V を測る場合の抵抗率補正係数（以後単に補正係数と呼ぶ）を求める。また試料の抵抗率は，全領域にわたって一様であると仮定とする。

試料の抵抗率 ρ は次式によって定義することができる。

$$\rho = Ft\,\frac{V}{I} \qquad \cdots (5)$$

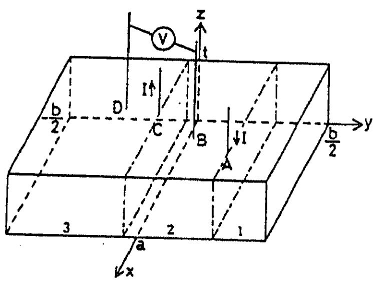

Fig. 3　抵抗率の四探針法による測定。探針Aから探針Cに向かって電流 I を流し，探針Bと探針Dの間の電位差 V を測定する。試料の辺の長さは，それぞれ a，b および t である。

ここで t は試料の厚さであり，F はこれから求めようとする補正係数である。厚さ t を補正係数 F の中に含めてもよいが，F を無次元にするために抵抗率 ρ を式（5）のような形で定義する。ところで，探針Bと探針Dの電位をそれぞれ $\boldsymbol{\Phi}_B$ と $\boldsymbol{\Phi}_D$ とすると，式（5）の電位差 V は

$$V=\boldsymbol{\Phi}_B-\boldsymbol{\Phi}_D \qquad \cdots (6)$$

と表される。したがって，問題は探針Bの電位 $\boldsymbol{\Phi}_B$ と探針Dの電位 $\boldsymbol{\Phi}_D$ を求める問題に帰着する。

試料中の任意の点の電位 $\boldsymbol{\Phi}$ はPiosson方程式（7）を満足する。

$$\nabla^2\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{r})=2\rho I\,[\delta(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_C)-\delta(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_A)] \qquad \cdots (7)$$

ここで，ベクトル $\boldsymbol{r}$，$\boldsymbol{r}_A$ および $\boldsymbol{r}_C$ は，それぞれ試料内の任意の点の座標（x，y，z），探針Aおよび探針Cが試料と接する点の座標（x_A，y_A，t）および（x_C，y_C，t）である。また $\delta(\boldsymbol{r})$ はデルタ関数で，x，y，z の関数 $\delta(x)$，$\delta(y)$，$\delta(z)$ の積で与えられる。式（7）を導く際に電流 I を等価的な電荷 q に置き換える関数 $q=\varepsilon^*\rho I/2\pi$ を用いている。ここで，ε^* は試料の比誘電率である。ところでFig. 3の一点鎖線で示すように，探針Aと探針Cの位置を通り，x 軸に平行な面で試料を三つの領域，すなわち

領域1：$y_A<y\leqq b/2$
領域2：$y_C\leqq y\leqq y_A$
領域3：$-b/2\leqq y<y_C$

に分割するならば，デルタ関数の性質により各領域では式（7）の右辺は0になり，Laplace方程式が得られる。

$$\nabla^2\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{r})=0 \qquad \cdots (8)$$

いま，試料の上に試料と同一の抵抗率および体積をもつ仮想試料を重ねた場合を考える。このようにしても，真の試料内の電位はまったく乱されることはない。また仮想試料内の電位分布は，真の試料内の電位分布と重ねた面に関して対称になる。このようなことをふまえて，式（8）の解を次の三つの条件のもとに求める。

(1) 抵抗率を測定するときは，試料は周囲と電気的に絶縁されているので，試料の外へ電流が流れ出ることはない。すなわち

$$\mathrm{grad}_n\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{r})\,|_S=0 \qquad \cdots (9)$$

ここでSは真の試料と仮想試料を重ね合わせてできる直方体の全表面のことであり，grad_n は電位 $\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{r})$ の表面Sに対する法線方向の傾きを意味する。

(2) 試料を三つの領域に分割したので，各領域における電位 $\boldsymbol{\Phi}_1(\boldsymbol{r})$，$\boldsymbol{\Phi}_2(\boldsymbol{r})$ および $\boldsymbol{\Phi}_3(\boldsymbol{r})$ は領域の境界で連続でなければならない。
すなわち

$$\boldsymbol{\Phi}_1(x,\ y_A,\ z)=\boldsymbol{\Phi}_2(x,\ y_A,\ z) \qquad \cdots (10)$$

$$\boldsymbol{\Phi}_2(x,\ y_C,\ z)=\boldsymbol{\Phi}_2(x,\ y_C,\ z) \qquad \cdots (11)$$

(3) 探針Aおよび探針Cが試料と接触する点（x_A，y_A，t）および（x_C，y_C，t）に電荷 $+q$ および電荷 $-q$ が存在するとして，これらの点を中心とする微小体積内の電界に対してGaussの法則を適用すると，次のような式が得られる。

$$\left.\frac{\partial\boldsymbol{\Phi}_2}{\partial y}\right|_{y=y_A}-\left.\frac{\partial\boldsymbol{\Phi}_1}{\partial y}\right|_{y=y_A}=2\rho I\delta(x-x_A)\,\delta(z-t) \qquad \cdots (12)$$

$$\left.\frac{\partial\boldsymbol{\Phi}_2}{\partial y}\right|_{y=y_C}-\left.\frac{\partial\boldsymbol{\Phi}_3}{\partial y}\right|_{y=y_C}=2\rho I\delta(x-x_C)\,\delta(z-t) \qquad \cdots (13)$$

以上の手続きによって求められる各領域の電位は次のとおりである。

$$\Phi_1(x,\ y,\ z)=B+\frac{\rho I y_A}{at}$$

$$+\sum_{m=1}^{\infty}\frac{2\rho I}{at\ \xi\sinh(b\xi)}\cos(\xi x)\cosh\left[\xi\left(y-\frac{b}{2}\right)\right]\times$$

$$\left\{\cos(\xi x_A)\cosh\left[\xi\left(y_A+\frac{b}{2}\right)\right]-\cos(\xi x_C)\cosh\left[\xi\left(y_C+\frac{b}{2}\right)\right]\right\}$$

$$+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2\rho I(-1)^n}{at\ \eta\sinh(b\eta)}\cos(\eta z)\cosh\left[\eta\left(y-\frac{b}{2}\right)\right]\times$$

$$\left\{\cosh\left[\eta\left(y_A+\frac{b}{2}\right)\right]-\cosh\left[\eta\left(y_C+\frac{b}{2}\right)\right]\right\}$$

$$+\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{4\rho I(-1)^n}{at\ \zeta\sinh(b\zeta)}\cos(\xi x)\cosh\left[\zeta\left(y-\frac{b}{2}\right)\right]\cos(\eta z)\times$$

$$\left\{\cos(\xi x_A)\cosh\left[\zeta\left(y_A+\frac{b}{2}\right)\right]-\cos(\xi x_C)\cosh\left[\zeta\left(y_C+\frac{b}{2}\right)\right]\right\}$$

……… (14)

$$\Phi_2(x,\ y,\ z)=B+\frac{\rho I y}{at}$$

$$+\sum_{m=1}^{\infty}\frac{2\rho I}{at\ \xi\sinh(b\xi)}\cos(\xi x)\times$$

$$\left\{\cos(\xi x_A)\cosh\left[\xi\left(y_A-\frac{b}{2}\right)\right]\cosh\left[\xi\left(y+\frac{b}{2}\right)\right]-\right.$$

$$\left.\cos(\xi x_C)\cosh\left[\xi\left(y_C+\frac{b}{2}\right)\right]\cosh\left[\xi\left(y-\frac{b}{2}\right)\right]\right\}$$

$$+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2\rho I(-1)^n}{at\ \eta\sinh(b\eta)}\cos(\eta z)\times$$

$$\left\{\cosh\left[\eta\left(y_{\mathrm{A}}-\frac{b}{2}\right)\right]\cosh\left[\eta\left(y+\frac{b}{2}\right)\right]-\right.$$

$$\left.\cosh\left[\eta\left(y_{\mathrm{C}}+\frac{b}{2}\right)\right]\cosh\left[\eta\left(y-\frac{b}{2}\right)\right]\right\}$$

$$+\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{4\rho I(-1)^{n}}{at\ \zeta\sinh(b\zeta)}\cos(\xi x)\cos(\eta z)\times$$

$$\left\{\cos(\xi x_{\mathrm{A}})\cosh\left[\zeta\left(y_{\mathrm{A}}-\frac{b}{2}\right)\right]\cosh\left[\zeta\left(y+\frac{b}{2}\right)\right]-\right.$$

$$\left.\cos(\xi x_{\mathrm{C}})\cosh\left[\zeta\left(y_{\mathrm{C}}+\frac{b}{2}\right)\right]\cosh\left[\zeta\left(y-\frac{b}{2}\right)\right]\right\} \qquad \cdots\cdots\cdots (15)$$

$$\Phi_{3}(x,\ y,\ z)=B+\frac{\rho I y_{\mathrm{C}}}{at}$$

$$+\sum_{m=1}^{\infty}\frac{2\rho I}{at\ \xi\sinh(b\xi)}\cos(\xi x)\cosh\left[\xi\left(y+\frac{b}{2}\right)\right]\times$$

$$\left\{\cos(\xi x_{\mathrm{A}})\cosh\left[\xi\left(y_{\mathrm{A}}-\frac{b}{2}\right)\right]-\cos(\xi x_{\mathrm{C}})\cosh\left[\xi\left(y_{\mathrm{C}}-\frac{b}{2}\right)\right]\right\}$$

$$+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2\rho I(-1)^{n}}{at\ \eta\sinh(b\eta)}\cos(\eta z)\cosh\left[\eta\left(y+\frac{b}{2}\right)\right]\times$$

$$\left\{\cosh\left[\eta\left(y_{\mathrm{A}}-\frac{b}{2}\right)\right]-\cosh\left[\eta\left(y_{\mathrm{C}}-\frac{b}{2}\right)\right]\right\}$$

$$+\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{4\rho I(-1)^{n}}{at\ \zeta\sinh(b\zeta)}\cos(\xi x)\cosh\left[\zeta\left(y+\frac{b}{2}\right)\right]\cos(\eta z)\times$$

$$\left\{\cos(\xi x_{\mathrm{A}})\cosh\left[\zeta\left(y_{\mathrm{A}}-\frac{b}{2}\right)\right]-\cos(\xi x_{\mathrm{C}})\cosh\left[\zeta\left(y_{\mathrm{C}}-\frac{b}{2}\right)\right]\right\}$$

$$\cdots\cdots\cdots (16)$$

ここで，$\xi = m\pi / 2$（mは整数），$\eta = n\pi / t$（nは整数）および$\zeta = (\xi^2 + \eta^2)^{1/2}$。

ところで探針Bは領域2内にあり，探針Dは領域3内にあるので，それぞれの電位は$\Phi_B = \Phi_2(x_B, y_B, t)$および$\Phi_D = \Phi_3(x_D, y_D, t)$となる。したがって，式（5），（6），(15)および(16)より補正係数Fの逆数は次のようになる。

$$F^{-1} = \frac{y_B - y_C}{a} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{a\,\xi \sinh(b\xi)} \times$$

$$\left\{\cos(\xi x_A)\cos(\xi x_B)\cosh\left[\xi\left(y_A - \frac{b}{2}\right)\right]\cosh\left[\xi\left(y_B + \frac{b}{2}\right)\right] - \right.$$

$$\cos(\xi x_B)\cos(\xi x_C)\cosh\left[\xi\left(y_B - \frac{b}{2}\right)\right]\cosh\left[\xi\left(y_C + \frac{b}{2}\right)\right] -$$

$$\cos(\xi x_A)\cos(\xi x_D)\cosh\left[\xi\left(y_A - \frac{b}{2}\right)\right]\cosh\left[\xi\left(y_D + \frac{b}{2}\right)\right] +$$

$$\left.\cos(\xi x_C)\cos(\xi x_D)\cosh\left[\xi\left(y_C - \frac{b}{2}\right)\right]\cosh\left[\xi\left(y_D + \frac{b}{2}\right)\right]\right\}$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{a\,\eta \sinh(b\eta)} \left\{\cosh\left[\eta\left(y_A - \frac{b}{2}\right)\right]\cosh\left[\eta\left(y_B + \frac{b}{2}\right)\right] - \right.$$

$$\cosh\left[\eta\left(y_B - \frac{b}{2}\right)\right]\cosh\left[\eta\left(y_C + \frac{b}{2}\right)\right] -$$

$$\cosh\left[\eta\left(y_A - \frac{b}{2}\right)\right]\cosh\left[\eta\left(y_D + \frac{b}{2}\right)\right] +$$

$$\left.\cosh\left[\eta\left(y_C - \frac{b}{2}\right)\right]\cosh\left[\eta\left(y_D + \frac{b}{2}\right)\right]\right\}$$

$$+ \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{a\,\zeta \sinh(b\zeta)} \times$$

$$\left\{\cos(\xi x_A)\cos(\xi x_B)\cosh\left[\zeta\left(y_A - \frac{b}{2}\right)\right]\cosh\left[\zeta\left(y_B + \frac{b}{2}\right)\right] - \right.$$

$$\cos(\xi x_B)\cos(\xi x_C)\cosh\left[\zeta\left(y_B - \frac{b}{2}\right)\right]\cosh\left[\zeta\left(y_C + \frac{b}{2}\right)\right] -$$

$$\cos(\xi x_A)\cos(\xi x_D)\cosh\left[\zeta\left(y_A-\frac{b}{2}\right)\right]\cosh\left[\zeta\left(y_D+\frac{b}{2}\right)\right]-$$

$$\cos(\xi x_C)\cos(\xi x_D)\cosh\left[\zeta\left(y_C-\frac{b}{2}\right)\right]\cosh\left[\zeta\left(y_D+\frac{b}{2}\right)\right]\Bigg\}$$

$$\cdots\cdots\cdots (17)$$

3．抵抗率補正係数Fの数値計算

試料の寸法や測定位置によって補正係数Fがどのように変化するのかを見るために，Fの数値計算を行った。式 (17) における和　　，　　及び　　の計算は，項が10^{-15}以下になった時点で打ち切った。

Fig. 4は試料の厚さtと補正係数Fの関係を示したものである。試料の辺の長さaとbはともに1.0 [cm] で，探針間隔Sは0.1 [cm] である。測定位置は挿入図に示されているように四カ所で，プローブ（四本の探針をまとめてこう呼ぶ）の中心の座標（x_0，y_0）は，それぞれ1 (0.5，0)，2 (0.5，0.3)，3 (0.1，0.3) および4 (0.1，0) [cm] である。カーブ1，2，3および4は，それぞれ測定位置1，2，3および4の補正係数Fに対応している。いずれの場合も補正係数Fは，試料がある厚さまではほぼ一定であるが，それより厚くなると急速に減少する。

Fig. 5は試料の辺aと補正係数Fの関係を示したものである。この計算例では試料の厚さtが0.04 [cm]，探針間隔Sが0.1 [cm]，プローブは常に試料の中心に位置するとして，つまり中心座標（x_0，y_0）は（a／2，0）として計算した。カーブ1，2，3，4および5は試料の辺bの長さが異なる場合で，それぞれbが0.5，0.6，0.8，1.0および1.2 [cm] に対応している。いずれの場合も辺aが長くなると補正係数Fは急激に増加し，辺aがある長さ以上になると補正係数Fは飽和する。そして，辺bの長さが長いほど，補正係数Fが飽和するまでの辺aの長さが長くなる。この結果から，当然のことではあるが，試料が小さいときは電位分布は試料の辺に極めて敏感に反応することがわかる。

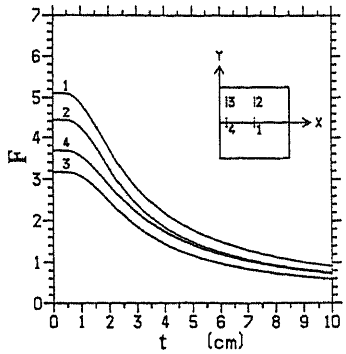

Fig. 4　抵抗率補正係数Fと試料の厚さtの関係。計算に用いられた測定系のパラメータは次のとおりである。試料の辺の長さ $a=b=1.0$ [cm]，探針間隔$S=0.1$ [cm]，測定位置1，2，3および4のプローブの中心座標（x_0，y_0）は，それぞれ (0.5, 0)，(0.5, 0.3)，(0.1, 0.3) および (0.1, 0) [cm] である。

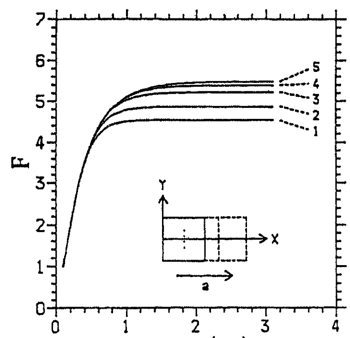

Fig. 5　抵抗率補正係数Fと試料の辺aとの関係。計算に用いられた測定系のパラメータは次のとおりである。試料の厚さ$t=0.04$ [cm]，探針間隔$S=0.1$ [cm]，プローブの中心座標（x_0，y_0）=（a／2，0）である。カーブ1，2，3，4および5は，試料の辺bがそれぞれ0.5，0.6，0.8，1.0および1.2 [cm] の場合に対応している。

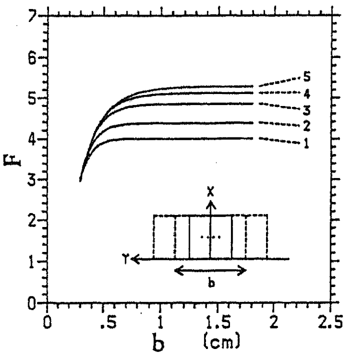

Fig. 6　抵抗率補正係数Fと試料の辺bの関係。計算に用いられた試料の厚さt，探針間隔Sおよびプローブの中心座標（x_0，y_0）はFig. 5の場合と同じである。カーブ1，2，3，4および5は，試料の辺aがそれぞれ0.5, 0.6, 0.8, 1.0および1.2［cm］の場合に対応している。

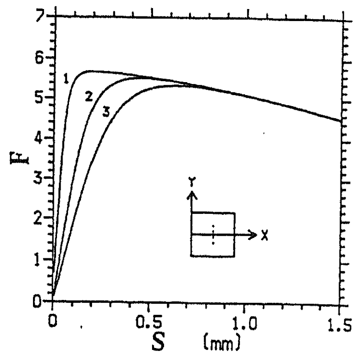

Fig. 7　抵抗率補正係数Fと探針間隔Sの関係。試料の辺aとbとして1.0［cm］，プローブの中心座標（x_0，y_0）として（0.5, 0）［cm］が用いられた。カーブ1，2および3は，試料の厚さtがそれぞれ0.01, 0.03, および0.05［cm］の場合に対応している。

Fig. 6は試料の辺bと補正係数Fの関係を示したものである。この計算例で用いられた試料の厚さt，探針間隔S，プローブの中心座標（x_0，y_0）についてはFig. 5の場合と同じである。カーブ1，2，3，4および5は，試料の辺aの長さがそれぞれ0.5, 0.6, 0.8, 1.0および1.2［cm］の場合に対応している。補正係数Fの変化についてはFig. 5の場合と同様の傾向を示している。Fig. 5における辺aが小さい領域，つまりカーブが急激に増加している領域とFig. 6における辺bが小さい領域における補正係数Fを比較すると，Fig. 5の方が補正係数Fの変化が大きいことがわかる。これはプローブに平行な辺aの方が垂直な辺bより試料内の電位分布におよぼす影響が大きいことを意味している。

Fig. 7はプローブの探針間隔Sと補正係数Fの関係を示したものである。計算に用いられた試料の辺aとbの長さはともに1.0［cm］で，プローブの中心座標（x_0，y_0）は（0.5, 0）［cm］である。カーブ1，2および3は，試料の厚さが異なる場合で，それぞれ厚さtが0.01, 0.03および0.05［cm］に対応している。この場合の補正係数Fの変化は，探針間隔Sを二つの領域に分けて説明することができる。すなわち補正係数Fが最大になるときの探針間隔SをS_Cとすると，$S < S_C$の領域と$S > S_C$の領域である。まず$S < S_C$の領域では探針間隔Sが試料の横方向の広がりに較べて非常に小さいので，試料の辺は電流分布に対してほとんど影響を与えない。この領域において探針間隔Sが小さくなるにつれて補正係数Fが小さくなるのは，試料の厚さの影響である。つまり試料の厚さtが一定であるから，探針間隔Sが小さくなればなるほどプローブから見た試料の厚さは厚くなる。これは探針間隔Sを固定して，試料の厚さtを大きくすることと等価である。試料の厚さを厚くしたときの補正係数Fの変化はすでにFig. 4で明らかにされている。すなわち$S < S_C$の領域における補正係数Fの変化は，主として試料の厚さの影響による変化と考えられる。次に$S > S_C$の領域では，試料のひろがりは固定されているので，探針間隔Sが大きくなればなるほどプローブから見た試料のひろがりは狭くなる。これは探針間隔Sを固定して試料の辺aやbを小さくすることと等価である。試料のひろがりと補正係数Fの関係についてはFig. 5とFig. 6で述べたとおりである。すなわち，$S > S_C$の領域における補正係数Fの変化は，主として試料のひろがりの影響による変化と考えられる。

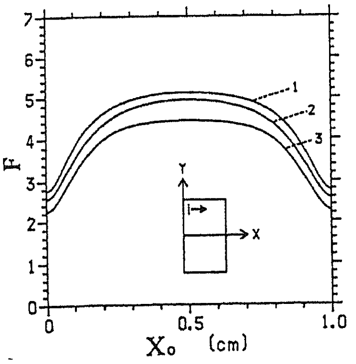

Fig. 8　プローブの中心 x の座標 x_0 と抵抗率補正係数 F の関係。この計算では，試料の辺 a と b としてそれぞれ1.0［cm］と2.0［cm］が用いられ，試料の厚さ t として0.05［cm］，探針間隔Sとして0.1［cm］が用いられた。カーブ1，2および3は，プローブの中心の y 座標 y_0 がそれぞれ0，0.6および0.7［cm］の場合に対応している。

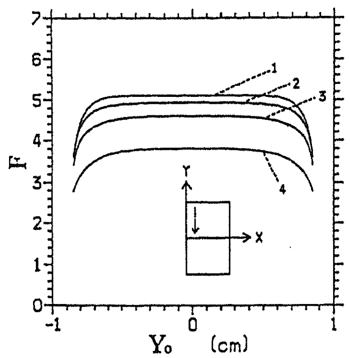

Fig. 9　プローブの中心の y 座標 y_0 と抵抗率補正係数 F の関係。計算に用いられたパラメータは，Fig. 8の場合と同一である。カーブ1，2，3および4は，プローブの中心の x 座標 x_0 がそれぞれ0.1，0.2，0.3および0.5［cm］の場合に対応している。

Fig. 8はプローブを y 軸に平行に保ったまま x 軸に平行に移動したときの補正係数 F の変化を示したものである。計算に用いられた試料の辺 a と b の長さはそれぞれ1.0［cm］と2.0［cm］であり，試料の厚さ t は0.05［cm］，探針間隔 S は0.1［cm］である。カーブ1，2および3は，プローブの中心の y 座標 y_0 がそれぞれ0，0.6および0.7［cm］の場合に対応している。いずれのカーブもプローブが試料の辺 b に近いところで補正係数 F は小さくなる。これは次のように考えられる。プローブが辺 b に近づくにつれて，電流の流れる領域は狭くなる。その結果，電流密度が大きくなり，探針Bと探針Dの間で測定される電位差は大きくなる。電位差はこの領域の抵抗率が大きいときにも大きくなるが，辺 b の近傍の抵抗率が中心部の抵抗率に較べて必ずしも常に大きい場合ばかりではないので，この電位差の増大を補正するためには補正係数 F は小さくならなければならない。

Fig. 9はプローブを y 軸に平行に保ったまま y 軸に平行に移動したときの補正係数 F の変化を示したものである。計算に用いられたパラメータはFig. 8の場合と同一である。カーブ1，2，3および4は，プローブの中心の x 座標 x_0 がそれぞれ0.1，0.2，0.3および0.5［cm］の場合に対応している。いずれの場合もプローブが辺 a に近ずくにつれて補正係数Fは小さくなる。辺 a の近傍で補正係数 F が小さくなる理由についてもFig. 8の場合と同様に考えることができる。補正係数 F の減少量を比較すると，Fig. 8の方がFig. 9より大きいことがわかる。この違いは電流分布のひろがり方の相違を考えることによって理解することができる。すなわちこのプローブは探針が一列に並んだ構造をしているが，この場合電流はプローブに平行な方向（y 軸方向）よりも垂直な（x 軸方向）により大きく広がる傾向がある。このため辺 a よりも辺 b の方が電位分布により大きな影響をおよぼすことになる。したがって，Fig. 9よりもFig. 8の方が補正係数の変化が大きくなるのである。

4．むすび

測定される試料は有限の大きさであるので，程度の差はあるが電流分布は試料の端部の影響をまぬがれない。したがって，抵抗率を正確に求めるためには，測定によって得られたデータを補正す

る必要がある。この論文ではデータを補正するときに使う補正係数を解析的に求める方法について述べた。まず，電流の流入点と流出点に電流と等価な電荷が存在するとして，Piosson方程式を導いた。そして，電流に対する境界条件をつけてLaplace方程式を解いて，各領域における電位を求めた。次に，電位に対する境界条件と等価電荷を含む微少体積内の電界に対してGaussの定理を適用することによって電位の式に含まれる未知数を決定した。最後に，得られた電位を用いて補正係数を導いた。補正係数の数値計算は特定のパラータについて行ったものであるが，補正係数の特性についてはこれらの図からほぼ把握できるものと思われる。

半導体の分野では，ここで紹介した四探針法はごく一般的な測定法として広く用いられている。しかし，半導体以外の分野では，四探針法はあまり使用されていない。半導体の分野では，円形試料を対象とする四探針法が比較的早くから規格として制定されたのに対して，半導体以外の分野では試料を直方体の形に成形して取り扱う場合が多く，この形状の試料に対する補正係数がほとんど紹介されなかったことがその普及をさまたげる一因にもなっている。材料メーカーが独自の方法で抵抗率を測定しているために，納入後改めて測定しなおしてみると，メーカの提供した数値と異なるということが実際に起こっている。しかし，現在直方体試料の抵抗率を四探針法によって測定するための規格案が，通産省工業技術院において審査されているところである。[18,19] これが正式に日本工業規格（ＪＩＳ）として制定されることになれば，半導体以外の分野にも四探針法が普及し，メーカーとユーザーとの間の混乱は解消されるものと思われる。

参考文献

1）ASTM F84-88.
2）DIN 50431.
3）JIS H0602.
4）L. B. Valdes : Proc. I. R. E. 42 (1954) 420.
5）A. Uhlir, Jr. : Bell Syst. Tech. J. 34 (1955) 105.
6）F. M. Smits : Bell Syst. Tech. J. 37 (1958) 711.
7）D. S. Perloff : Solid-State Electron. 20 (1977) 681.
8）M. Yamashita and M. Age : Jpn. J. Appl. Phys. 23 (1984) 1499.
9）M. Yamashita : Jpn. J. Appl. Phys. 25 (1986) 563.
10）M. Yamashita : Jpn. J. Appl. Phys. 26 (1987) 1550.
11）M. Yamashita, Sh. Yamaguchi and H. Enjoji : Jpn. J. Appl. Phys. 27 (1988) 869.
12）M. Yamashita : Jpn. J. Appl. Phys. 27 (1988) 1317.
13）M. Yamashita and H. Enjoji : Jpn. J. Appl. Phys. 28 (1989) 258.
14）M. Yamashita, Sh. Yamaguchi, T. Nisii, H. Kurihara and H. Enjoji : Jpn. J. Appl. Phys. 28 (1989) 949.
15）M. Yamashita, T. Nishii, H. Kurihara, H. Enjoji and A. Iwata : Jpn. J. Appl. Phys. 29 (1990) 776.
16）M. Yamashita, T. Nishii, A. Iwata, H. Kurihara and N. Tanaka : Jpn. J. Appl. Phys. 32 (1993) 246.
17）W. H. Johnson, W. A. Keenan and A. K. Smith : Technical note, Prometrix Corporation.
18）山下ほか：有機・複合系新素材の標準化に関する調査研究成果報告書，高機能性高分子材料編，高分子素材センター（1991）38－100頁。
19）山下ほか：有機・複合系新素材の標準化に関する調査研究成果報告書，高機能性高分子材料編，高分子素材センター（1992）29－74頁。