微結晶化シリコン薄膜熱電対を用いた 集積化パワーセンサ

正 員 古田 土 節 夫 (アンリツ)

非会員 杉 浦 吾 男 (アンリツ)

1. はじめに

可聴周波数から高周波領域における通信回線の敷設・保守維持や民生機器の製造を行ううえで、伝送特性、雑音レベル、各種波形の信号レベルを高分解能、高精度で測定できるレベルメータが不可欠である⁽¹⁾⁽²⁾。従来、レベルメータのレベル検出素子としては、真空熱電対⁽³⁾やダイオードが使われてきた。ダイオードを用いる方法は、ダイオードの二乗検波特性を利用したもので、検出感度が大きいという特徴を有するが信号波形の違いによる検出レベルの変動や、測定すべき信号レベルの大きさや周囲温度の変化による検出感度の変化が大きいという欠点を有し、これらを補正するための校正用電源やマイクロプロセッサなどを内蔵させる必要があった⁽⁴⁾⁽⁵⁾。一方、真空熱電対を用いる方法は、真空管に封入された金属細線の熱電効果を用い、接合部近傍に設けられた熱線での発熱量を熱起電力に変換して測定する方法で、信号レベルの実効値を検出するので波形の違いによるレベル変動は生じない。更に、信号検出用熱電対と負帰還によって駆動される直流置換用熱電対との差信号を演算増幅器の差動入力部に接続することにより、入力電力の実効値電圧に比例した直流出力信号を簡単に得ることができるといって特徴を有している。しかしながら、上記信号を得るためには、2個の熱電対の特性を極めて良く一致させる必要があり、特性のばらつきの多い真空熱電対を用いる際は、個々の特性を測定して真空熱電対の特性をそろえる選別作業を行っていた。更に、定格電力に対する溶断電力の余裕度が小さく、従って、測定時

の誤接続、誤操作などにより過大電力が供給されると簡単に焼損し、これを防ぐうえで、検出回路よりも規模の大きい保護回路を必要としたほか、真空管という特殊形状のため実装上多くの空間を必要とした⁽²⁾。従ってこれらの問題点をなくした新しい熱電対の開発が望まれていた。

一方、半導体薄膜技術の進展により、真空熱電対に置き換え得るものとして、半導体蒸着膜を用いた薄膜熱電対が注目され種々検討されてきた⁽⁶⁾⁽⁷⁾。半導体蒸着膜は、熱電能が大きく、また、薄膜化することにより熱抵抗や熱容量を小さくでき、検出感度が大きく、かつ比較的形狀の小さな熱電対を実現することができた。しかしながら、真空蒸着法では、安定にドーピングを行うのが難しく、従って、たい積膜の特性の再現性が乏しく、かつ微細加工技術を施せないで特性のそろった熱電対を作成するまでには至らなかった。

本研究では、前記真空熱電対方式の問題点を解決するため、微結晶化シリコン薄膜を構成要素とする薄膜熱電対方式の検討を行った。すなわち、プラズマCVD法を用いて作製されたドーピング効率の高い微結晶化シリコン薄膜^{(8)~(14)}に着目し、微結晶化シリコン薄膜の有する熱電対特性を評価した。特に、従来研究されていなかったp形微結晶化シリコン薄膜についても検討した。次に、焼損レベルの向上と、二組の熱電対素子の特性を一致させるため、微細加工技術を用いて微結晶化シリコン薄膜を構成要素とする双子形熱電対素子を作成し、この素子とチップ状演算増幅器とをセラミックパッケージにハイブリッド集積化したパワーセンサを試作し、レベル検出素子としての諸特性を評価した。

2. 微結晶化シリコン薄膜のたい積方法および熱電効果

ドーピング効率の高い微結晶化シリコン薄膜のたい

Integrated Thermopile Power Sensor Using μ c-Si Thin Films.
By Setsuo Kodato, Member & Itsuo Sugino, Non-member (Anritsu Corporation).

古田土節夫：正員、アンリツ(株)第1研究所

杉浦吾男：非会員、アンリツ(株)計測器事業部

積には容量結合形高周波プラズマ CVD システムを用いた。原料ガスとしては、高信頼性の膜が期待できる⁽¹⁵⁾四弗化シリコン (SiF_4) を主とし、また、たい積基板との密着性を高めるためシラン (SiH_4) を添加した。たい積する基板としては、実用化の観点より熱的に安定でかつ熱伝導率の小さなガラス板(コーニング 7059)を用いた。ドーピング効率を高めるための n 形および p 形の制御には水素希釈のホスフィン (PH_3) およびジボラン (B_2H_6) を原料ガスに添加した。ドーピング効率の高い、従って暗導電率の大きな微結晶化シリコン膜のたい積条件は比較的狭く、再現性良くドーピング膜のたい積できた条件でのガス流量比は n 形では $\text{SiF}_4/\text{SiH}_4=2$ 、また p 形では $\text{SiF}_4/\text{SiH}_4=5$ であった。再現性良く得られるためのたい積条件が狭い理由としては、 SiF_4 の分解によりフッ素ラジカルが生成し、わずかな分圧比の違いによってもエッチングガスとしての作用が増大することによるものと思われる。たい積時の基板温度としては 400°C 、また放電圧力としては 400 Pa を用いた。

微結晶化シリコン薄膜の微結晶化度の制御方法については、 SiH_4 を原料ガスとして用いた場合については詳しく検討されているが⁽¹⁶⁾、 SiF_4 と SiH_4 の混合ガスを用いた場合については、あまり検討されていない。従って、本研究では放電パワー密度およびドーピングガスの流量を制御する方法を用いた。ドーピング

効率の高いアモルファスおよび微結晶化シリコン薄膜の結晶性の評価にはレーザラマン分光法⁽¹⁴⁾を用いた。また、暗導電率およびゼーベック係数の測定には熱電効果測定素子⁽¹⁷⁾を用い、更に Van der Pauw 法を用いてホール効果を測定し、キャリア濃度、キャリア移動度を評価した。

図 1 はドーピング効果の高い、従って大きな暗導電率を有するアモルファスおよび微結晶化シリコン ($\text{Si}:\text{H}:\text{F}$) 薄膜のラマンスペクトルを示す図である。サンプル A, B および C の各暗導電率(σ_0)はそれぞれ $0.2\text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、 $4.0\text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ および $16.2\text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ である。サンプル A は完全なアモルファス相から構成されているが、サンプル B および C は微結晶化がかなり進んでおり、微結晶化度としては 70% の値が得ら

図 1 ドーピングシリコン薄膜のレーザラマンスペクトル

Fig. 1. Raman intensity vs. Raman frequency for highly doped $\text{Si}:\text{H}:\text{F}$ films.

ドーピングシリコン薄膜の暗導電率

図 2 ドーピングシリコン薄膜の暗導電率に対するゼーベック係数、キャリア濃度およびキャリア移動度特性

Fig. 2. Dark-conductivity vs. Seebeck coefficient, carrier density and carrier mobility for highly doped $\text{Si}:\text{H}:\text{F}$ films.

れている。

図2はドーピング効率の高いp形のアモルファスおよび微結晶化シリコン薄膜の暗導電率に対するゼーベック係数、キャリア濃度およびキャリア移動度の関係を示す図である。横軸は暗導電率 σ_D ($S \cdot cm^{-1}$) を、また縦軸はゼーベック係数 S ($\mu V/K$)、キャリア濃度 n (cm^{-3}) およびキャリア移動度 μ_H ($cm^2/V \cdot s$) をそれぞれ示す。図中、○印はゼーベック係数を、●印はキャリア濃度を、また▲印はキャリア移動度をそれぞれ表す。図2よりアモルファス相より微結晶相に移行することによりシリコン薄膜の暗導電率は $0.2 S \cdot cm^{-1}$ より $2 S \cdot cm^{-1}$ と急激に増大している。これはキャリア移動度が $0.05 cm^2/V \cdot s$ より $1.0 cm^2/V \cdot s$ と大幅に増大したことによる。一方、キャリア濃度は $3 \times 10^{19} cm^{-3}$ より $1.5 \times 10^{19} cm^{-3}$ に減少し、ゼーベック係数としてはほぼ同じ値が得られた。一方、暗導電率が

図3 ゼーベック係数-暗導電率特性
Fig. 3. The Seebeck coefficient (S) of μc -Si thin films plotted as a function of dark-conductivity (σ_D).

図4 ゼーベック係数の温度依存性
Fig. 4. Seebeck coefficient (S) as a function of reciprocal temperature.

$4 S \cdot cm^{-1}$ 以上の微結晶化シリコン膜のゼーベック係数は、キャリア濃度の増加に伴い、減少する傾向が得られた。

図3はn形およびp形の微結晶化シリコン薄膜の暗導電率とゼーベック係数との関係を示す図で、横軸は暗導電率 σ_D ($S \cdot cm^{-1}$) を、また縦軸はゼーベック係数 S ($\mu V/K$) を表す。ゼーベック係数としては、 $\Delta T = 100^\circ C$ における平均の値を用いた。図中、●印はp形膜を、また△印はn形膜を表す。図3に示されているように、p形膜においては暗導電率が、数 $S \cdot cm^{-1}$ においてゼーベック係数が $260 \sim 300 \mu V/K$ と極めて大きい値が得られており、しかもゼーベック係数が暗導電率の逆数の対数に依存する結果が得られた。一方、n形膜においては、最大暗導電率として $100 S \cdot cm^{-1}$ が得られた。このときのゼーベック係数としては $S = -110 \mu V/K$ が得られている。ゼーベック係数と暗導電率との関係には、p形膜と同様の相関が見られた。

図4はゼーベック係数の室温付近における温度依存性を示す図で、●印はp形膜を、△印はn形膜を示す。p形膜温度係数としては $0.1\%/K$ 前後と小さな値が得られた。一方、n形膜は室温付近を境に温度係数が増大する結果が得られた。

3. 双子形熱電対素子の構造

焼損レベルの向上と、二組の熱電対素子の特性を一致させることを目標とした双子形熱電対素子の模式図を図5に示す。素子サイズは $4.1 mm \times 3.6 mm$ である。素子は、ガラス基板と、基板の表面に設けられた同一形状の二組の熱電対素子および加熱用薄膜抵抗体とから構成され、微結晶化シリコン薄膜 (P_1) と金属薄膜 (M_1) とによって第一の熱電対が形成され、同様に

図5 双子形熱電対素子
Fig. 5. A twin-type thermopile power sensor.

微結晶化シリコン薄膜と金属薄膜 $P_2, M_2; P_3, M_3; P_4, M_4$ で第二, 第三, 第四の熱電対が形成される。そして, これら第一から第四までの各熱電対の温接点となる接合部は前記薄膜抵抗体の両側に近接して配置され, その冷接点となる端子はジャンパ線によって直列に接続した。従って, 熱起電力は C_3 を共通端子 (-) とし, C_1, C_2 を (+) 端子として出力され, 一方の薄膜抵抗体には端子 T_1, T_2 より測定すべき高周波電力が, 他方の薄膜抵抗体には端子 T_3, T_4 より直流電力が供給され, 出力端子 C_1, C_2 間の熱起電力が零となるように直流電力を制御すると, このときの直流電力の値が測定すべき高周波電力の値を示すことになる。

熱電対を構成する微結晶化シリコン薄膜としては, 図3および図4で得られた実験結果をもとに, ゼーベック係数が大きく, かつゼーベック係数の温度依存性が少ない p 形膜を, また金属薄膜としては, プロセス上の整合性により後述するニクロム薄膜を用いた。薄膜抵抗体としては, 比較的温度係数の小さなニクロム薄膜⁽¹⁸⁾を用いた。電極部は熱電対の冷接点を形成し, しかも冷接点を常に室温に保持する必要がある, 熱放散を高めるため金めっきを施した。ガラス基板の厚みは, 素子のチップサイズが $4.1\text{ mm} \times 3.6\text{ mm}$ と比較的大きいのでハンドリングしやすいようにすることと, 焼損レベルを向上させるうえで熱抵抗を小さくする必要があり, これらの条件を満たす $150\text{ }\mu\text{m}$ のものを用いた。素子の出力インピーダンスとしては $10\text{ k}\Omega$ 以下に, また薄膜抵抗体の抵抗値としては信号源とのインピーダンスの整合を図るうえで $70\text{ }\Omega$ から $90\text{ }\Omega$ を目標値とした。従って, 微結晶化シリコン薄膜の膜厚を $0.8\text{ }\mu\text{m}$ に, またニクロム薄膜の膜厚を $200\text{ }\text{\AA}$ 前後に設定した。

4. 集積化パワーセンサ

双子形熱電対素子の特性を, 高精度でかつ高確度で評価するうえでは, 外部接続点における熱起電力の影響を少なくし, また素子の熱的平衡度の安定化を図る必要がある。これらの条件を満足させ, かつパワーセンサの小形化を図るための双子形熱電対素子チップとチップ状の低オフセット電圧演算増幅器とをセラミックパッケージにハイブリッド集積化した実効値形パワーセンサを試作した。この際, 双子形熱電対素子の冷接点を周囲温度に保持させるため, 素子を銅ブロックのヒートシンク上に銀ペーストで固定して, セラミックパッケージ内に実装した。集積化パワーセンサ素子の回路図を図6に示す。測定用各信号は, セラミックパッ

図6 集積化パワーセンサ回路図

Fig. 6. A circuit diagram of integrated power sensor.

図7 出力電圧-入力電力特性

Fig. 7. Output voltage vs. input power.

ケージの各ピンに接続して行った。また, セラミックパッケージのふたをし, 密封した状態で以下の諸特性を測定した。

図7は薄膜抵抗体 R_2 のみに直流電力を入力させたときの入出力特性で, 横軸は入力電力の大きさを, また縦軸は出力電圧の大きさを示す。入力電力の大きさが $3.5 \times 10^{-2}\text{ mW}$ から 90 mW の範囲において, 出力電圧の大きさが入力電力の大きさに比例する良好な結果が得られ, 1 mW 入力時の検出感度としては 5 mV/mW が得られた。演算増幅器の電圧増幅度を 20 dB に設定したので, 熱電対自身の検出感度は 0.5 mV/mW である。

図8は双子形熱電対素子の検出感度の平衡度の測定結果を示す図で, 平衡度の測定には, 薄膜抵抗体 R_2 に供給した基準直流電力 P_2 と, このとき出力電圧が零となるのに必要な薄膜抵抗体 R_1 に供給した直流電力

図 8 入力電力に対する検出感度の平衡度特性

Fig. 8. Characteristics of sensitivity balance between two thermopiles against input power.

図 9 検出感度の周波数特性

Fig. 9. Frequency characteristics of sensitivity deviation.

P_1 との比 P_1/P_2 と前記基準電力との関係から求めた。横軸は直流電力 P_2 の大きさを、また縦軸は平衡度 $r = P_1/P_2$ を示し、直流電力 P_2 の大きさが 2.5×10^{-2} mW から 16 mW の範囲において、平衡度からのずれは $\pm 7 \times 10^{-4}$ 以下と極めて小さく、二組の熱電対素子の検出感度特性は極めて良く一致していることが確認できた。

図 9 は双子形熱電対素子の検出感度の周波数依存性を示す図で、入力電力信号としては正弦波を用いた。また、測定時の入力電力の大きさは +5 dBm 一定とした。横軸は入力周波数の大きさを、また縦軸は出力電圧偏位を示し、入力周波数の増大と共に出力電圧が若干増加する結果が得られた。出力電圧の 3 dB ダウン周波数は 900 MHz である。

図 10 は、出力電圧の周囲温度変化による影響の様子を評価した実験結果を示す図で、周囲温度については、 -12°C 、 25°C 、および 52°C の 3 点について行った。 $+25^\circ\text{C}$ においては、入力電力レベル変動幅 10 dB に対し、出力変動幅は 0.01 dB 以下と極めて小さな値が得られた。周囲温度が -12°C および $+52^\circ\text{C}$ におい

図 10 直線性の入力電力および周囲温度依存性

Fig. 10. Linearity vs. input power at the various temperatures.

図 11 薄膜抵抗の入力電力特性

Fig. 11. Resistance of thin film resistor as a function of input power.

ては、入力レベルが低い領域において、出力電圧レベルの変動幅が増大している。この要因としては演算増幅器のオフセット電圧の変動が考えられる。

図 11 は双子形熱電対素子に用いられている薄膜抵抗体の入力電力抵抗値変化特性についての実験結果を示す図で、横軸に入力電力の大きさを、また縦軸は低抵抗値の大きさを示している。入力電力の増大に伴い、抵抗値は増大し、+240 mW の入力電力を供給した時点で素子は焼損する結果が得られた。

5. 考 察

〈5・1〉 微結晶化シリコン薄膜の熱電対材料としての特徴について 表 1 は微結晶化シリコン薄膜を用いた双子形熱電対素子と従来の真空熱電対との性能を比較してまとめたものである。熱電対材料としての微結晶化シリコン薄膜は、真空熱電対よりも 4 倍以上の大きなゼーベック係数、すなわち熱電能を有することを確認した。また、微細加工技術を用いて、ガラス基板上に同一形状のものを二組並列に配置した双子形熱電対素子を作成し、二組の熱電対素子の特性を極めて

表 1 レベル検出素子用熱電対の諸特性
Table 1. Characteristics of thermopiles for level detector.

項目	種類	双子形熱電対素子	真空熱電対
熱電能(mV/K)		0.25	0.06
検出感度(mV/mW)		0.5	4
出力抵抗(Ω)		5,000	1~50
焼損レベル(mW)		240	~17
(焼損温度)		(~240°C)	(~1,100°C)
選別作業		無	有

良く一致させることができたので、従来の真空熱電対のように特性をそろえるための選別作業は不要となった。検出感度としては、真空熱電対のほうが4mV/mWと、微結晶化シリコン薄膜を用いた双子形熱電対素子の0.5 mV/mWに比べて8倍大きい。これは、熱抵抗の大きな金属細線を熱電対および熱線に用いていることによる。一方、双子形熱電対では焼損レベルの向上のため、検出感度を低く抑えたためである。実際、表1に示すように、双子形熱電対素子の焼損レベルは240 mWと真空熱電対の17 mWよりも14倍以上高めることができた。熱電能と検出感度の値より予想される焼損時の熱電対の温接点における温度としては、微結晶化シリコン薄膜熱電対では240°C、また真空熱電対では1,133°Cと予想される。微結晶化シリコン熱電対の焼損温度が240°Cと低いのは、加熱ヒータに用いているニクロム薄膜が480°C前後で焼損することと対応している。一方、微結晶シリコン薄膜は600°C近くまで安定なので、ニクロム薄膜に代わる熱的安定のよい薄膜抵抗体を用いることにより、焼損レベルの更なる向上が期待できる。

〈5・2〉 集積化パワーセンサの特徴について 表2は本研究による集積化パワーセンサと従来の真空熱電対式実効値パワーセンサおよびダイオード形パワーセンサとの性能を比較しまとめたものである。素子形状としては、真空熱電対方式よりも1/3に小形化されている。また、ダイオード方式での複雑な保護回路を不要とした。測定周波数範囲としては、DC, 10 Hz~30 MHzと、真空熱電対方式よりも広めることができた。検出感度においては0.5 mV/mWと他の方式より一〜三けた小さいが、検出レベルにおける温度変化特性は50°Cの変動幅に対し0.05 dB(検出レベル: -10~-7 dBm)と真空熱電対方式(検出レベル: -12~-2 dBm)に比べて約1/5、またダイオード方式(検出レベル: -45~-25 dBm)に比べて1/40と極めて小さな値が得られた。同様に、直線性についても

表 2 レベル検出素子としての各種パワーセンサの諸特性

Table 2. Characteristics of power sensor for level detector.

	集積化 パワーセンサ	真空熱電対方式	ダイオード 検波方式
焼損レベル (mW)	240	17	—
測定周波数 (Hz)	DC, 10~30 M	DC, 10~20 M	1 k~220 M
検出レベル (dBm)	-10~-+7	-12~-2	-45~-25
感度の温度特性 (単位/温度変動幅)	0.05 dB/50°C	0.25 dB/45°C	2 dB/50°C
直線性の温度 特性	0.2 dB/12 dB/ 50°C	0.3 dB/10 dB/ 45°C	0.5 dB/12 dB/ 50°C
素子面積(mm)	160	480	複雑な保護回路
検波方式	実効値形	実効値形	平均値形

図 12 双子形熱電対素子の入力抵抗の相対変化の経時特性

Fig.12. Deterioration with age of relative resistance of twin-type thermopile.

入力レベルの12 dBの変動幅に対し0.01 dB、また周囲温度の50°Cの変動幅に対しても0.2 dBと他の方式に比べて低い値が得られ、従来の素子と比較し優れた特性を有することを確認した。

〈5・3〉 微結晶化シリコン熱電対を用いた双子形熱電対素子の信頼性について 集積化パワーセンサの構成要素である微結晶化シリコン薄膜を用いた双子形熱電対素子の信頼性について評価した。評価方法としては、170°Cの高温放置による二組の熱電対の入力抵抗およびゼーベック係数の相対経時変化を調べた。図12は双子形熱電対素子の各入力抵抗の相対変化経時特性の一例で、横軸に放置時間を、また縦軸は各初期値 R_{10} , R_{20} と初期値からのずれの大きさ $\Delta R_1=(R_1-R_{10})$ と $\Delta R_2=(R_2-R_{20})$ との比 $\Delta R_1/\Delta R_2(\%)$ を示す。10,000 Hの高温放置に対し、各入力抵抗の相対

図 13 ゼーベック係数の相対変化経時特性
Fig. 13. Deviation of relative Seebeck coefficient with time.

変化率が $\pm 0.5\%$ 以内と極めて低い値が得られた。同様に、図 13 はゼーベック係数の相対変化経時特性を示したもので、横軸は放置時間を、また縦軸はゼーベック係数の各初期値 S_{10} 、 S_{20} と初期値からのずれの大きさ $\Delta S_1 = (S_1 - S_{10})$ と $\Delta S_2 = (S_2 - S_{20})$ との割合 $\Delta S_1 / \Delta S_2 (\%)$ を示す。ゼーベック係数の相対変化率は放置時間の増加と共にゆっくりと増大するが 10,000 H の放置に対しても、相対変化率は $\pm 0.4\%$ 以内と極めて低いことが確認できた。

以上の実験結果より、微結晶化シリコン薄膜熱電対は、実用上特に問題がないことを確認した。

6. 結 び

高周波レベルメータのレベル検出素子用に、微結晶化シリコン薄膜を構成要素とする熱電対集積化パワーセンサを開発した。微結晶化シリコン薄膜の形成にはプラズマ CVD 法を用いた。熱電対にはゼーベック係数の大きな p 形膜とニクロム薄膜を用い、焼損レベルの向上と、二組の熱電対素子の特性を極めて良く一致させるための双子形熱電対素子を試作・評価し、二組の熱電対の諸特性が良く一致することを確認した。更に、双子形熱電対素子とチップ状の演算増幅器をセラミックパッケージにハイブリッド集積化したパワーセンサを試作し、レベルメータのレベル検出素子として、従来の素子よりの幾多の特徴を有することを確認した。特に、真空熱電対と比較し、(i) 焼損レベルの大幅向上 (14 倍以上)、(ii) 検出感度の温度依存性の低減 (1/3 以下)、および (iii) 素子形状の小形化 (1/3 以下)、をそれぞれ実現できた。

また、双子形熱電対素子の信頼性についても検討し、10,000 時間の 170°C 高温放置に対し、インピーダ

ンス、ゼーベック係数の相対変化率が $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 0.4\%$ 各以内に収まっており、実用化に耐えることを確認した。

終りに、本研究に関して懇切なる御指導と御討論をいただいた東京工業大学 高橋 清教授ならびに小長井誠助教授に対して心より感謝いたします。また、素子の試作および評価に協力して下さいました中飯修一氏、衣川 茂氏ならびに宮越俊彦氏に感謝いたします。

(平成元年 1 月 25 日受付、同元年 6 月 20 日再受付)

文 献

- (1) 藤田・瀧村：「ビデオ用発振器とレベル測定器」，安立テクニカル，No. 6，50 (昭 35-6)
- (2) 米田・大島・近江・本山：「ベースバンド伝送特性装置」，同上，No. 32，56 (昭 49-9)
- (3) 内藤・日野：電気計測，p. 54 (昭 52) 朝倉書店
- (4) 塩見・大島・野本・岡・宮原・古都：「超広帯域選択レベル測定器の開発」，安立テクニカル，No. 37，62 (昭 54-3)
- (5) 中津川・森・深谷・板谷・岡・浦上：「スマート選択レベル測定器」，同上，No. 39，53 (昭 55-3)
- (6) 小沼：「Ge 蒸着膜の熱電特性」，電学誌，89，1406 (昭 44-7)
- (7) R. Koike & I. Tajima：「Thin-film thermoelectric transducer for measurements of low level between 0 and 11GHz」，*Proc. Instn. Elect. Engrs.*，121，28 (1974)
- (8) A. Matsuda, S. Kamasaki, K. Nakagawa, H. Okusi, K. Tanaka, S. Iizima, M. Matsumura & H. Yamamoto：「Electrical and Structural Properties of Phosphorus-Doped Glow-Discharge Si : F : H and Si : H Films」，*Japan J. Appl. Phys.*，19，L 305 (1980)
- (9) P. Nielsen & V. L. Dalal：「Thermoelectric power and conductivity of As doped a-Si : H : F」，*Appl. Phys. Lett.*，37，1090 (1980)
- (10) T. Hamasaki, H. Kurata, M. Hirose & Y. Osaka：「A New Technique of Boron Doping in Si : H Films」，*Japan J. Appl. Phys.*，20，L 84 (1981)
- (11) A. Matsuda, T. Yoshida, S. Yamasaki & K. Tanaka：「Structural Study on Amorphous-Microcrystalline Mixed-Phase Si : H Films」，*ibid.*，20，L 439 (1981)
- (12) W. E. Spear, G. Willeke, P. G. Le Comber & A. G. Fitzgerald：「Electronic properties of microcrystalline silicon films prepared in glow discharge plasma」，*J. De. Physique*，42，c 4-257 (1981)
- (13) Y. Uchida, T. Ichimura, M. Ueno & M. Ohsawa：「Properties of microcrystalline P-doped glow discharge Si : H films」，*ibid.*，42，c 4-265 (1981)
- (14) R. Tsu, J. Gonzalez-Hernandez, S. S. Chao, S. C. Lee & K. Tanaka：「Critical volume fraction of crystallinity for conductivity percolation in phosphorus-doped Si : F : H alloys」，*Appl. Phys. Lett.*，40，534 (1982)
- (15) 松村・酒井・前田・古川：「アモルファス・シリコン中の不純物拡散機とフッ素導入によるブロッキング」，電子通信学会技報，ED 82-8，9 (昭 57)
- (16) A. Matsuda：「Formation kinetics and control of microcrystalline in μ C-Si : H from glow discharge plasma」，*J. Non-Crystalline Solids*，59 & 60，767 (1983)
- (17) 古田上・宮越：「微結晶化 Si 薄膜の熱電効果特性とパワーセンサへの応用」，電気学会電子デバイス研究，EDD-88-68 (昭 63)
- (18) 日本学術振興会薄膜第 131 委員会編：薄膜ハンドブック，p. 491 (昭 58) オーム社