

マイクロコンピュータを用いた電気炉 温度調節器の製作

岡茂八郎*・南竹 力・坂元 渉・肥後 悟・沼田 正

(受理 昭和54年5月31日)

THE MANUFACTURING PROCESS OF THERMOSTATIC CONTROLLER FOR FURNACE USING MICRO PROCESSING UNIT

Mohachiro OKA, Chikara MINAMITAKE, Wataru SAKAMOTO
Satoru HIGO, Tadashi NUMATA

We are making blue electroluminescent diodes for single-crystalline substrates which has been grown by chemical transport technique using the powder of ZnS, ZnSe, ZnS_xSe_{1-x} , etc. The temperature of the electric furnace has been controlled by the mechanical thermostatic controller because the above technique requires high temperature about 800°C-1000°C.

However, the mechanical thermostatic controller has many disadvantages, i.e. its function is very much limited and during operation a man is needed to operate this controller.

Now to avoid these disadvantages and to get better control in making of blue electroluminescent diodes, we have manufactured an electrical thermostatic controller using a micro processing unit.

This has several advantages over the mechanical one, i.e. its function is not limited, from the beginning to the end, according to the desired program, the temperature will be automatically controlled and it has got same stability as the mechanical one.

§1 ま え が き

我々は、ZnS, ZnSe 及び ZnS_xSe_{1-x} 等の材料を用いて青色発光ダイオードの試作を行なっている。青色発光ダイオードを作るためには、上記材料の単結晶を得てこの単結晶を適当な大きさに切り出し、pn 接合を作り、電極を付ける必要がある。単結晶の作成法としてヨウ素をトランスポータとして用いる化学輸送法や、昇華法、気相反応法等を試みている。また、pn 接合の作成法として、ガリウム等の適当な不純物を気化し試料単結晶中に拡散させたり、試料単結晶上に伝導形式の異なる異種の材料を成長させヘテロ接合を作る方法等を試みている。

これら各作業は、全て炉を使用して適切な温度のもとで行なわれる必要がある。さらに、温度の上昇過程

での上昇速度、下降過程での下降度等にも欠陥のない単結晶を得るために制限が加えられることが多い。これら温度管理の複雑さから炉には電気炉が用いられている。

従来、温度のプログラムによる可変のためには機械式のコントローラーが使われているが、その機能が固定されており、運転途中でたびたび人手による機能設定の変更が必要であり、また機械式であるために保守のめんどうさから大変使いづかった。そのため我々は、プログラムの変更だけで複雑なプロセスコントロールの出来るマイクロコンピュータを用いた電気炉温度調節器を製作した。さらに、最小限のハードウェアの変更で種々の目的に調節器を使用出来るようソフトウェアに大きな役割を持たせ、全体の機能を容易に変更出来るよう考慮した。この装置により温度のプログラムによる制御がほとんど自動化され、単結晶作成等に必要温度管理が大変楽になった。

以下、マイクロコンピュータを用いた電気炉温度調

*鹿兒島大学大学院電子工学専攻

節器の製作について報告する。

§ 2 デジタルプロセス制御の基本式¹⁾

マイクロコンピュータは、デジタル計算器の部類に入るのでこれを使って温度を制御するためには、システムをサンプル値制御系としなければならない。すなわち、一定時間ごとにサンプリングして得られた間欠的信号によりあらかじめ決められた制御式で演算を行ない操作量を決め、この信号をホールド回路を通して操作部に送りプロセスの制御を行なう。

図1はデジタル制御系のブロック図を示す。本報告は、ブロック図中の演算処理装置の部分にマイクロコンピュータを用いたものである。

本装置には、アナログ制御系で良く使用されている3項動作(比例、積分、微分)を用いるPID制御を少し変形して用いた。アナログ調節計の理想化された3項動作の式は(1)で示される。

$$P = K \left(e + \frac{1}{T_I} \int edt + T_D \frac{de}{dt} \right) \quad (1)$$

P: 出力 e: 偏差 K: 比例ゲイン T_I: 積分時間 T_D: 微分時間

デジタル制御系では、この式から誘導された差分

形のPID制御式が基本制御式として用いられる。

$$P_n = K \left\{ e_n + \sum \frac{\tau}{T_I} e_n + \frac{T_D}{\tau} (e_n - e_{n-1}) \right\} \quad (2)$$

これを係数の相関をなくした式に直すと

$$P_n = K_P e_n + \sum K_I e_n + K_D (e_n - e_{n-1}) \quad (3)$$

K_P=K: 比例項ゲイン K_I=Kτ/T_I: 積分項ゲイン K_D=KT_D/τ: 微分項ゲイン τ: サンプリング周期 e_n: 偏差 P_n: 出力 suffix n はサンプリングの時点を示す。

我々の装置では、現在のところ微分項は省いてあるので実際にはPI制御動作の調節器である。(4)式は我々の装置での基本式である。

$$P_n = K_P e_n + \sum K_I e_n \quad (4)$$

(4)式を実現するようマイクロコンピュータのプログラムを作成し動作させている。また、サンプリング周期では60秒とし、K_P、K_Iは実験的な値を使用している。さらに処理データ長の制約からK_Pはe_nの大きさによって2段階に変化し、e_nが小さい時はK_Pが大きくなるようプログラムされている。

§ 3 装置の概要

図2に本装置の大まかなブロック図を示す。

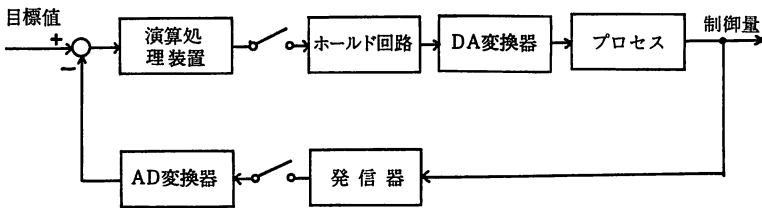


Fig.1 デジタル制御系のブロック図¹⁾

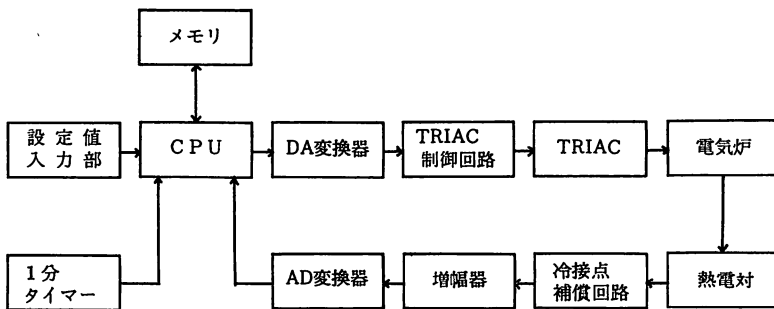


Fig.2 電気炉温度調節器ブロック図

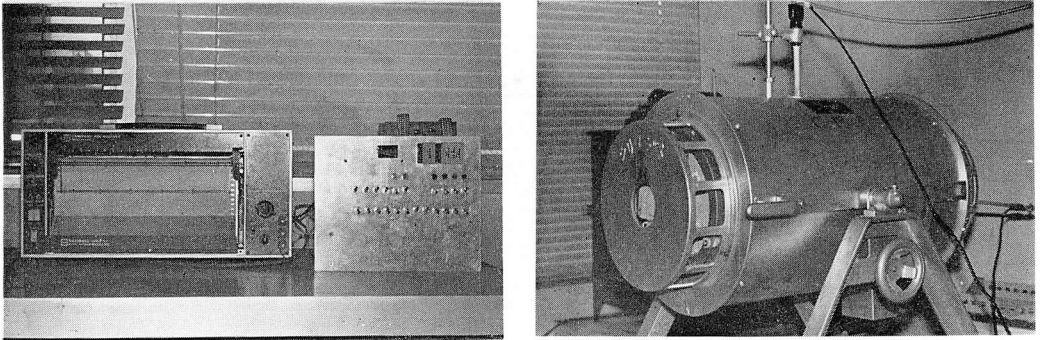


Fig. 3 温度調節器, 電気炉

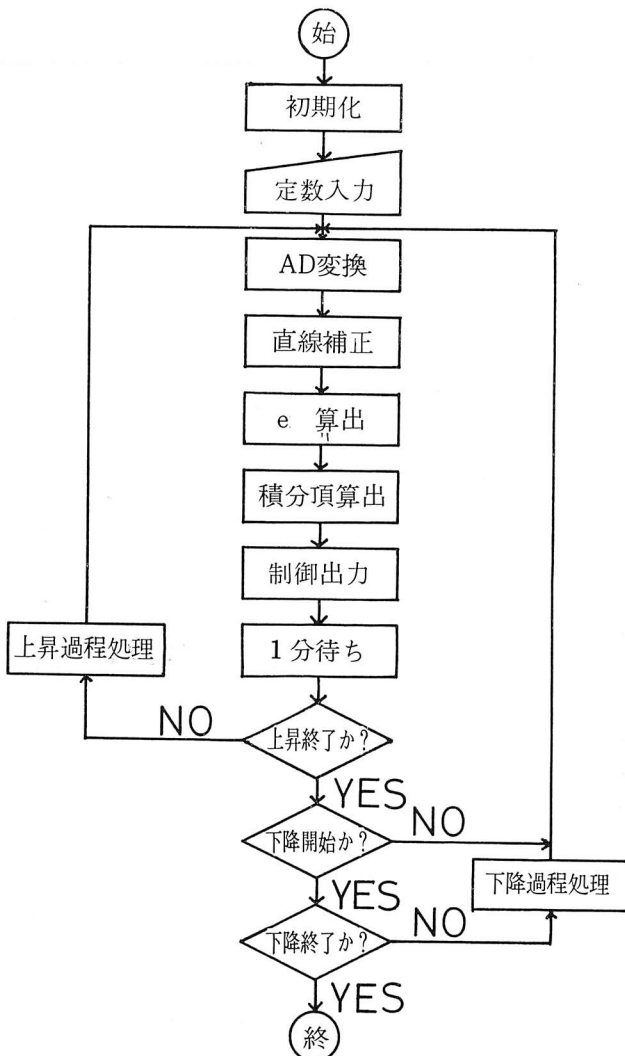


Fig. 4 プログラム流れ図

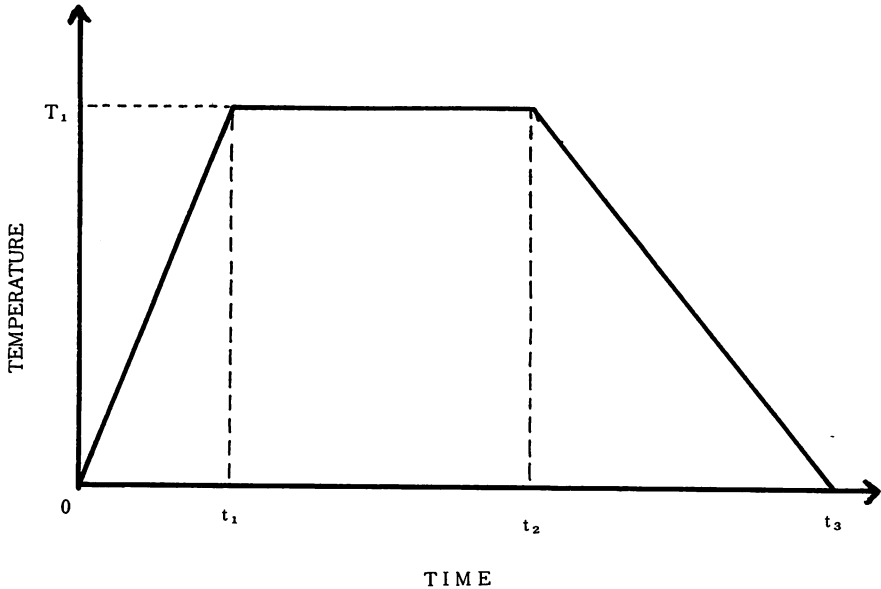


Fig. 5 電気炉温度変化プログラム

各ブロックについて説明する。熱電対は白金-白金ロジウムを使ったものである。熱電対の出力は、冷接点を用いないと室温分の誤差を持つので、トランジスタの B-E 間ダイオードの順方向降下電圧の温度依存性を利用した冷接点補償回路を入れてある²⁾。この熱電対の出力電圧は $0 \sim 1000^\circ\text{C}$ で約 $0 \sim 11\text{mV}$ と小さいので AD 変換器入力に必要な $0 \sim 5\text{V}$ にまで一般の演算増幅器を使用した増幅器によって増幅される。ここで、増幅器の後にサンプルホールド回路が入っていないのは、AD 変換に要する時間 (1mS) に比べて電気炉の温度変化は非常にゆっくりしているので必要ないと考え設けられていない。AD 変換器は、CPU と、AD 変換器内に設けられた DA 変換器と、コンパレータより成っている。CPU と DA 変換器により発生された ramp 電圧と、熱電対よりの増幅された電圧をコンパレータで比較し、そのコンパレータの反転を CPU で調べ、CPU がコンパレータの反転を確認した時点で AD 変換を終わる。コンパレータが反転した時点で DA 変換器に加えられていたデジタル値が AD 変換の結果である。AD 変換の結果は、現在の炉温を表わし、これと 2 進化されている平衡設定温度とを比較することによって e_n を算出する。 e_n は制御出力算出の基礎となる。この AD 変換器は 8bit の分解能を持ち、外部とのインターフェイスを考慮して 10 進数で 200 の AD 変換器出力のとき炉温が 1000°C にな

るように増幅器の増幅度を決定してある。このためこの AD 変換器では、 $\pm 5^\circ\text{C}$ 以下の温度変化は分解できない。しかし、冷接点補償器や増幅器の安定度を考えると $\pm 5^\circ\text{C}$ の分解能は、適当な値だと考える。

DA 変換器も 8bit 精度のものである。DA 変換器は、C-MOS の IC と、ラダー抵抗群により構成され、出力インピーダンスを下げるため voltage follower を付加されている。

TRIAC 制御回路は、DA 変換器の出力の変化 ($0 \sim 5\text{V}$) で約 $30^\circ \sim 160^\circ$ までの間で点弧角を変化できるように設計されている。

CPU は、日本電気 (株) 製の 4 bit 並列処理用 IC ($\mu\text{PD}-751\text{D}$) を使用している。RAM を 1KByte、ROM を 1KByte 使用している。演算処理部に 1 分タイマー (電源同期式) と、設定入力部を接続し装置を使い易くしている。1 分タイマーは、装置全体の時間基準として働き、サンプリング周期の決定や炉温を時間の関数として図 5 のような変化をさせる為の基準としてある。設定値入力部は、BCD 出力を持つサミールスイッチで構成されており、10 進-2 進変換や各定数の桁合せなどはプログラムで行なっている。図 3 に演算処理装置と、本装置に制御されている電気炉の写真を示す。

本装置の基本となる実験的制御式は

$$P_n = K_P e_n + \sum \frac{1}{16^i} e_n \quad (5)$$

である。ここで K_P は、 e_n が 10 進数で 125 以下のと

きは 2, 126 以上のときは 1, である。プログラムは (5) 式と図 5 の温度プログラムを満足するよう作られており図 4 にその大まかな流れ図を示す。

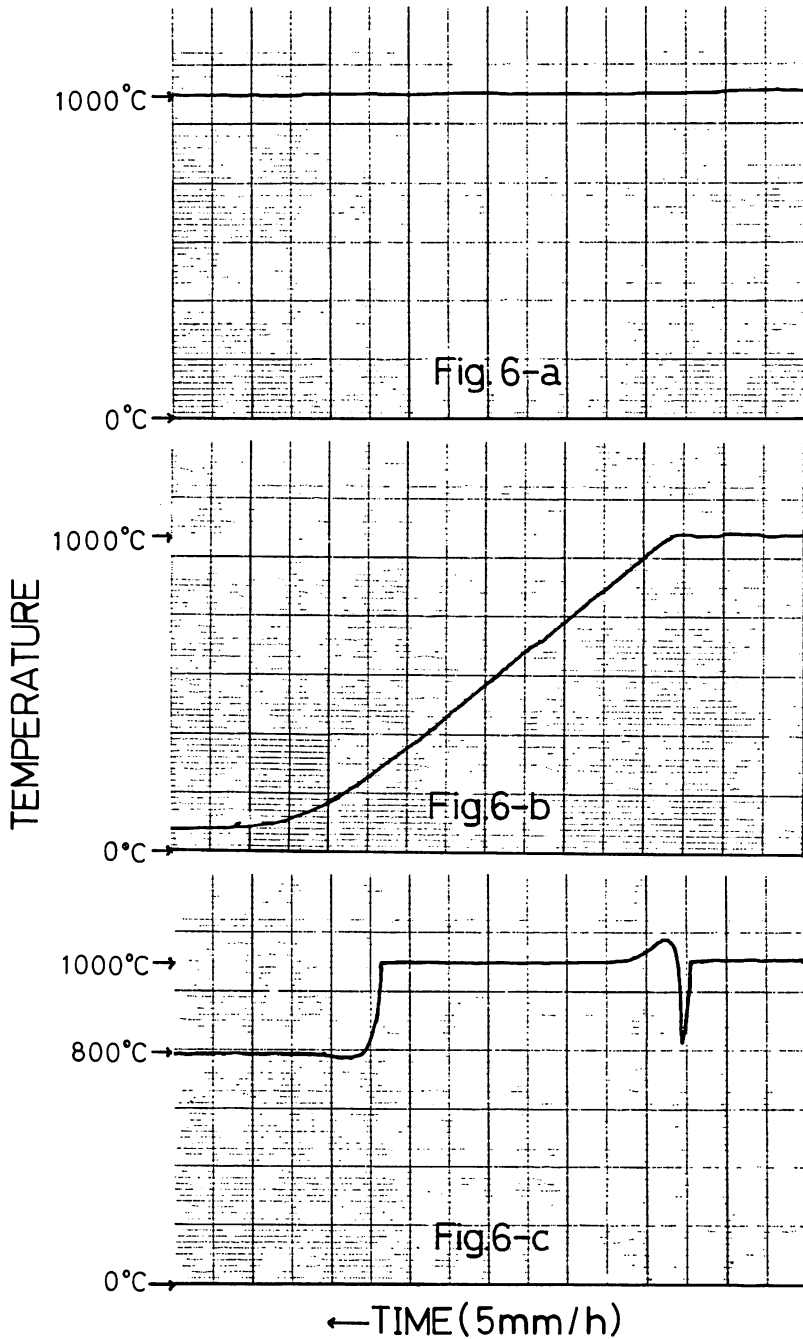


図5で、 $0-t_1$ 間の上昇速度、 t_2-t_3 間の下降速度は、1時間当りの温度の変化量を入力し、プログラムの定数入力処理部でCPUの都合に合うよう処理され2進定数として記憶される。この温度の上昇、下降過程は、段階的に5℃ずつ加減することにより達成されている。 t_1-t_2 間の平衡温度も入力処理は同じである。また、本装置では、熱電対の温度対出力電圧の非直線性の補正をメモリ内に書き込まれた変換表によってプログラムで行なっている。このCPUは、割り込み処理能力がないため1分の経過はタイマーとプログラムにより行なっている。

本装置に用いた各種データのビット数は、設定値(上昇速度、平衡温度、下降速度)、AD変換、DA変換には8bit、平衡時間、積分項の蓄積には12bitとなっている。さらにマイクロコンピュータ内の演算はすべて切り捨て演算である。

§4 制御特性

図6に本装置の温度制御特性の実際を示した。この実験では、平衡温度を1000℃に設定し、白金-白金ロジウム熱電対で炉温を測定している。

図6-aは、電気炉が平衡温度に達した後、24時間に渡って炉温を記録したものである。この図からははっきりわからないが、AD変換器の分解能に関して $\pm 5^\circ\text{C}$ の範囲で炉温が数十分から数時間の周期で変動しているのが観測される。

図6-bは、炉温平衡状態から $50^\circ\text{C}/\text{h}$ の割合で温度を降下させたものである。

図6-cの前半の変動は、電気炉ヒーター電源だけ

が30分間切れるという外乱からの回復状態を示している。後半の変動は、平衡温度の設定値を1000℃から800℃に変更した場合の追従の様子を示している。外乱からの回復状況は、10%位のオーバーシュートを伴っているが約2時間以内に初期状態になっている。

§5 まとめ

図6の実験結果から見て、従来の機械式温度調節器と比較して本装置は、結晶作成用電気炉制御器として十分な特性を示していると思う。また、プログラムの変更により相当複雑な温度変化のプログラムにも全自動で対処できる事、取り扱いが容易で、騒音の発生がない事、接点不良等によるトラブルが発生しにくい事など本装置にマイクロコンピュータを使用した利点は充分生かされたものと思う。

将来の改良する余地として、処理データ長を増して温度精度を上げる事、プログラムに組み込まれた制御式を再評価してオーバーシュートを除くことなどがある。最後に本装置のプログラム作成に当り制御理論に関して有益なアドバイスを下さった湯ノ口助手に感謝します。

文 献

- 1) 山下直・保志尚: デジタルプロセス制御, コロナ社, 1969.
- 2) 棚瀬繁雄: 冷接点補償器の製作, トランジスタ技術, Jan. (1979) CQ出版.
- 3) 松本吉彦: MYCOM-4の製作, トランジスタ技術別冊, CQ出版, 1976.
- 4) 沢田正三: 温度と熱, 共立出版, 1970.