



(11) FREMLÆGGELSESSKRIFT 141784

DANMARK

(61) Int. Cl.<sup>3</sup> C 30 B 13/28



(21) Ansøgning nr. 5288/73 (22) Indleveret den 27. sep. 1973

(23) Løbedag 27. sep. 1973

(44) Ansøgningen fremlagt og  
fremlæggelsesskriftet offentliggjort den 16. jun. 1980

DIREKTORATET FOR  
PATENT- OG VAREMÆRKEVÆSENET

(30) Prioritet begæret fra den  
28. sep. 1972, 2247651, DE  
28. jun. 1973, 2332968, DE

---

(71) SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT, Berlin und Muenchen, 8 Muenchen 2, Wit-  
telsbacherplatz 2, DE.

(72) Opfinder: Hans Stut, 8031 Groebenzell, Maistr. 18, DE.

(74) Fuldmægtig under sagens behandling:  
Internationalt Patent-Bureau.

---

(54) Fremgangsmåde og apparat til digelfri zonesmeltning af en halvleder=  
stav.

Opfindelsen angår en fremgangsmåde til digelfri zonesmeltning af en i holde-  
re lodret holdt halvlederstav, ved hvilken smeltezonen, der føres gennem halv-  
lederstaven, overvåges ved hjælp af et fjernsynskamera, og hvor de af fjernsyns-  
kameraet afgivne, elektriske impulser anvendes som mål for de med de enkelte  
billedlinier overensstemmende diametre af det i fjernsynskameraet tilvejebragte  
smeltezonebillede, af hvilke impulser der afledes er-værdier, der tilføres dels  
i det mindste én reguleringskreds, der indvirker på afstanden mellem de to holde-  
re, der bærer halvlederstaven, dels en anden reguleringskreds til regulering af  
opvarmningen, i hvilken anden reguleringskreds der som reguleringsstørrelse for-  
uden diameteren af smeltezonen ved størkningsfronten anvendes i det mindste end-  
nu en af impulserne fra fjernsynskameraet afledt størrelse, som er kendetegnende  
for smeltezonens geometri, såsom volumen og vinkel mellem tangenter i karakteri-

stiske punkter af smeltezonens profil i forhold til lodret retning.

Sådanne fremgangsmåder er beskrevet i tysk patentskrift nr. 1 231 761 og i dansk patentansøgning nr. 1320/72. De har dog kun vist sig anvendelige ved zone-smeltning i quasi-stationær tilstand, d.v.s. når diameteren af udgangsstaven og af den ud fra smelten størknende stav kun afviger uvæsentligt fra hinanden eller har et næsten konstant forhold. Skal der i den udkrystalliserende stav tilvejebringes en konisk overgang mellem stavdele af forskellig diameter, skal den til smeltezonen førte energi tilpasses volumenet af den til enhver tid nødvendige smeltezone samt afkølingen og de elektriske koblingsforhold mellem smeltezonen og induktionsspolen, der tilvejebringer smeltezonen. Dette er for eksempel tilfældet, når der til en forrådsstav af større diameter for omsmeltning af denne ved zone-smeltning tilsmeltes en lille kimkrystal, og smeltezonen først tilvejebringes ved grænsen mellem kimkrystallen og forrådsstaven. I dette tilfælde skal også den koniske overgang styres.

Dette er ikke muligt ved de tidligere kendte fremgangsmåder til automatisk styring af processen.

Opfindelsen går ud på at tilvejebringe en fremgangsmåde, hvorved den konisk forløbende overgangszone mellem den til forrådsstaven tilsmeltede kimkrystal og til det sted, hvor den størknede halvlederstav har sin ønskede diameter, der kan afvige fra forrådsstavens diameter, trækkes efter et forelagt program, og ved hvilken der samtidigt i den quasi-stationære tilstand undgås afvigelser fra den ønskede diameter af den størknende halvlederstav hidrørende fra ændringer i forrådsstavens diameter.

Dette opnås ifølge opfindelsen ved, at den ved sammenligning af diameteren af smeltezonen med dennes bør-værdi dannede reguleringsafvigelse tilføres over en integrator til den ene indgang af en reguleringsforstærker og sammenlignes i denne med den af impulserne fra fjernsynskameraet afledte kvadratsum over billeddiametrene af smeltezonen, hvorpå den ved sammenligningen dannede reguleringsafvigelse benyttes til regulering af afstanden mellem de to stavholdere, og ved at i det mindste én af vinklerne for de nævnte tangenter til smeltezonens profil sammenlignes med vinklens bør-værdi, og den derved dannede reguleringsafvigelse anvendes til regulering af smeltezonens opvarmning i retning af at formindske denne reguleringsafvigelse.

Til bestemmelse af volumenet bliver den del af smeltezonen, der bestemmer halvlederstavens tilvækst, aftastet linjevis, og diameteren af smeltezonen udmåles for hver linje, kvadreres og adderes. Desuden bestemmes samtidigt ud fra impulserne for den linjevis aftastede smeltezone diameteren ved størkningsfronten og vinklen ved de karakteristiske punkter: Størkningsfront, smeltefront og vendepunkt. Den geometriske form af den koniske stavdel bestemmes ved den pågældende diameter

og den tilhørende vinkel, idet diameteren og den tilhørende vinkel er en funktion af den vej, som størkningsfronten har tilbagelagt.

Diameteren og de karakteristiske vinkler afhænger af den af størkningsfronten tilbagelagte vej som en cosinus-funktion. Endvidere bestemmes den til enhver tid ønskede vinkel til regulering af energitilføringen ifølge opfindelsen ud fra sammenknytningen af diameteren og den dertil hørende vinkel over den af størkningsfronten tilbagelagte vejlængde som funktion af diameteren.

Ved de tidligere bekendtgjorte fremgangsmåder blev med henblik på en automatisk regulering enten det af smeltespolen omfattede volumen eller den til smelte-zonen førte energi holdt konstant. Specielt den første fremgangsmåde med konstantholdelse af volumenet er tilstrækkelig til en quasi-stationær drift, ved hvilken hverken smeltezonens vandringshastighed eller diameteren, eventuelt diameterforholdet mellem de to stavdele, eller betingelserne for radial eller aksial varmeafgivelse ændres.

Fordelene ved fremgangsmåden ifølge opfindelsen i forhold til de tidligere kendte fremgangsmåder er, at reguleringen af den samlede proces uafhængigt af den netop nævnte konstans kan gennemføres således, at både energitilføringen og afstanden mellem stavenderne, der begrænser smelte-zonen, svarer til de til enhver tid optimale stabilitetsbetingelser eller dyrkningsbetingelser. Et sådant tilfælde foreligger for eksempel, når der skal udkrystalliseres en silicium-enkrystal ud fra en tynd kinkrystal til en forelagt diameter, hvorved de geometriske dimensioner ændrer sig i væsentlig grad og dermed også den i enhver position af smelte-zonen nødvendige energi.

Til virkeliggørelse af programmet for overgangen fra kinkrystal til opnåelsen af den ønskede diameter af den stav, der skal udkrystalliseres, må der på grundlag af traktionsbetingelserne, begyndelses- og slutbetingelserne sørges for et jævnt forløb af diameteren hen over stavens længde. Det foreslås derfor at opbygge programmet på en cosinus-funktion af diameteren og af den tilhørende vinkel i afhængighed af den gennemløbne vej, hvilken funktion i første tilnærmelse svarer til det eksperimentelt fundne forløb af den "cosinus-formede" overgang.

Cosinus-funktionen, som nærmest svarer til de eksperimentelt fundne værdier, er

$$d^*(x_k) = r_0 + R - \left[ (R - r_0) \cdot \cos \frac{x_k \cdot \pi}{k} \right],$$

hvor  $d^*(x_k)$  er diameteren af størkningsfronten som funktion af  $x_k$ , der er den af størkningsfronten tilbagelagte vej,  $r_0$  er radius af kinkrystallen,  $R$  radius af den færdige cylindriske stav, der skal udkrystalliseres,  $k$  længden af overgangszonen og  $\pi$  cirkelkonstanten.

Det har endvidere vist sig, at der for en cylindrisk dyrkning kræves en bestemt åbningsvinkel af den smelteflydende zone ved størkningsfronten, og denne vinkel afhænger igen inden for visse grænser af diameteren af størkningsfronten. Der kan også fastlægges et forløb af åbningsvinklen hen langs overgangsområdet, hvilket forløb kan afledes ad f.eks. matematisk vej ud fra den ovenfor nævnte diameterfunktion ved differentiering.

Ud fra de to funktioner for diameteren og for den tilhørende vinkel i afhængighed af den tilbagelagte vej  $d = f(x_k)$  og  $\alpha = f(x_k)$  kan der også udledes funktionen af vinklen i afhængighed af diameteren  $\alpha = f(d)$ . Anvendelsen af denne funktion til regulering af vinklen  $\alpha$  kan da fordelagtigt anvendes, når den som ideal ansete funktion  $d = f(x_k)$  som følge af forstyrrelser og uregelmæssigheder i dyrkningen ikke kan overholdes nøjagtigt.

Ligeledes kan der ventes ændringer i de geometriske og termiske betingelser, når smeltezonen nærmer sig enden af staven, eller når forrådsstaven har varierende diameter, eller også når den omgivende atmosfære, f.eks. en beskyttelsesgas eller vakuum, ændres eller udskiftes, eller når en doteringsgasstrøm rammer den smelteflydende zone.

Opfindelsen angår også et til udøvelse af fremgangsmåden ifølge opfindelsen bestemt apparat til automatisk regulering af digelfri zonesmeltning af en i holdere fastholdt halvlederstav, hvilket apparat indeholder et fjernsynskamera, der overvåger smeltezonen, en regneenhed, der foretager udregninger på grundlag af de fra fjernsynskameraet afgivne, elektriske impulser, og flere reguleringskredse, der tilføres de af regneenheden udregnede er-værdier og indvirker dels på afstanden mellem de to holdere for halvlederstaven, dels på opvarmningen af smeltezonen. Ifølge opfindelsen er et sådant apparat ejendommeligt ved en bør-værdigiver, der afgiver bør-værdien for diameteren af smeltezonen ved størkningsfronten til den ene indgang af en første reguleringsforstærker, hvis anden indgang tilføres den fra regneenheden afgivne tilsvarende er-værdi, medens den af denne reguleringsforstærker dannede reguleringsafvigelse over et integrationstrin tilføres den ene indgang til en anden reguleringsforstærker, hvis anden indgang tilføres den af regneenheden udregnede kvadratsum over er-værdierne af smeltezonens diameter, og den herved tilvejebragte, og på udgangen af denne reguleringsforstærker optrædende reguleringsafvigelse via et tredje reguleringsstrin bringes til at indvirke på en indstillingsmotor, der igen indvirker på en mekanisme, der bestemmer afstanden mellem de to stavholdere, samt ved at de fra regneenheden afgivne er-værdier vedrørende i det mindste én vinkel for karakteristiske tangenter til smelteprofilen tilføres en anden reguleringskreds, der samtidigt får tilført den eller de fra bør-værdigiveren afgivne bør-værdier for denne eller disse karakteristiske tangenters vinkler, og den i denne reguleringskreds tilvejebragte regu-

leringsafvigelse føres videre til regulering af indstillingen af energikilden, der opvarmer smeltezone.

Opfindelsen forklares nærmere i det følgende i forbindelse med tegningen, der viser et blokdiagram over et apparat ifølge opfindelsen.

Generelt kan om funktionsforløbet ved fremgangsmåden anføres, at der i f.eks. en datamat 11 er registreret et program, som gengiver afhængigheden af stavdiameteren, begyndende ved kinkrystallen og afhængig af den af fasegrænsen eller af induktionsvarmespolen 12 tilbagelagte vej.

I et fjernsynskamera 20, hvormed smeltezone 2 af halvlederstav optages, aftastes afbildningen af smeltezone. De elektriske impulser behandles i et efterfølgende elektronisk trin 3, hvorved volumen af smeltezone, de karakteristiske vinkler ved overfladen af smeltezone og diameteren af den størknede stav bestemmes. Over en mellemkoblet volumenreguleringskreds med en reguleringsforstærker 4, som er underlagt den egentlige diameterreguleringskreds med en reguleringsforstærker 10 og en forstærker 5 til tilpasning af diameterafvigelser til den ønskede volumenværdi, betjenes en stræknings- og opstemningsmekanisme 7, 8, 8a og 9 i zonetrækningsapparatet. Med en paralleltliggende vinkelreguleringskreds, hvormed den til den pågældende diameter hørende vinkel reguleres til den ønskede værdi, reguleres energitilføringen via generatorfrekvensen over en reguleringsforstærker 6.

De to reguleringskredse bliver med en tredje "geometri"-reguleringskreds således sammenknyttet med programværket 11, at der fås den ønskede geometriske form af overgangen, uden at den smeltede zone bliver ustabil, d.v.s. størkner eller drypper af.

Den halvlederstav 1, der skal behandles, er på sædvanlig måde anbragt i et zonesmeltningsapparat, der ikke er vist på tegningen, og holdes i vertikal stilling af holdere 1a og 1b ved stavens ender, medens staven er koaksialt omsluttet af en induktionsvarmespole 12, der tilvejebringer smeltezone 2. Ved en relativ bevægelse af induktionsvarmespolen 12 i forhold til halvlederstaven 1 i dennes akseretning føres smeltezone 2 successivt gennem halvlederstaven. I det mindste den ene af halvlederstavens holdere, f.eks. den nederste holder 1a, er indrettet, så at den kan forskydes i retning af dobbeltpilen 9 i forhold til den anden holder, så at de to stavdele, der ved tilstedeværelsen af en smeltezone, som strækker sig over hele halvlederstavens tværsnit, er adskilt af denne smeltezone, kan nærmes til eller fjernes fra hinanden. Dette resulterer inden for rammerne af stabilitetsgrænserne i en opstemning eller en strækning af smeltezone 2, så at den mekanisme, der styrer denne bevægelse, sædvanligvis omtales på tysk som "Streck-Stauchmechanismus". Hertil kendes forskellige muligheder, hvorfor der er set bort fra mekanismens konstruktion på tegningen og i beskrivelsen. Drivkraften til denne stræk-stemmekanisme afgives fra en motor 8, der styres fra udgangen af den første

kaskadereguleringskreds.

Induktionsvarmespolen 12 er på sædvanlig måde parallelforbundet med en kondensator 12a til dannelse af en højfrekvenssvingningskreds med fast afstemning. Denne højfrekvenssvingningskreds er over en koblingsspole 19 løst koblet til en højfrekvensgenerator 18. Frekvensen af de fra generatoren 18 afgivne elektriske svingninger kan varieres kontinuerligt inden for et frekvensområde, som indeholder resonansfrekvensen for den af induktionsvarmespolen 12 og kondensatoren 12a dannede svingningskreds, så at energien til induktionsvarmespolen 12 kan ændres ved ændring af højfrekvensgeneratorens afstemning. Det skal bemærkes, at der også kan anvendes andre kendte muligheder til indstilling af energitilføringen til induktionsvarmespolen 12, f.eks. anvendelse af en svingningskredskondensator 12a med varierbar kapacitet og/eller anvendelse af en variabel tilkobling 19 til højfrekvensgeneratoren 18.

Som i det tidligere omhandlede tilfælde anvendes der også her som reguleringsføler et elektronisk kamera 20 til overvågelse af smeltezone 2, f.eks. et kommercielt fjernsynskamera, som kan være forbundet med en fjernsynsgengiver for at muliggøre visuel kontrol af fjernsynsbilledet af smeltezone 2. Der sørges for en passende orientering af det elektroniske kamera 20 i forhold til smeltezone 2 og for opretholdelse af konstante optagelsesbetingelser på en sådan måde, at hver af de af kameraet 20 pr. aftastecyklus afgivne impulser indeholder en bestemt angivelse om hver sin bestemte diameter af det af kameraet 20 optagne billede. Dette er netop tilfældet, når aftastelinjerne på kameraets målplade står vinkelret på billedet af halvlederstavens akse, og når den mod smeltezone 2 rettede optiske akse af optageoptikken har uforanderlig længde og hældning i forhold til stavaksen. Dette vil ved ikke positionsfast smeltezone 2 sige, at kameraet 20 under opretholdelse af sin orientering skal forskydes med samme hastighed som krystallisationsfronten.

Da den til krystallisationsfronten i fjernsynsbilledet svarende impuls i den pr. aftastecyklus leverede impulsrække som grænseimpuls har særlig stor amplitude, er det uden videre muligt ved hjælp af et filter i den efter kameraet 20 koblede regneenhed 3 at udskille denne impuls  $p_k$  fra de enkelte impulsrækker og at bestemme den med impulsens længde proportionale værdi af  $d(x_k)$ . Den fornødne proportionalitetsfaktor fås ved justeringen af arrangementet. Til bestemmelse af randvinklen  $\alpha(x_k)$  kræves endvidere diameteren  $d(x_k + \lambda)$ , som hører til den op til krystallisationsgrænsen beliggende aftastelinje, som er et billede af det flydende materiale. Man får så

$$\alpha(x_k) = \arctg \frac{d(x_k) - d(x_k + \lambda)}{2\lambda}$$

hvor  $\lambda$  er den til afstanden mellem to ved siden af hinanden liggende aftastelinjer

svarende afstand i den virkelige smeltezones målestok. Det skal bemærkes, at man i stedet for vinklen  $\alpha(x_k)$  også kan anvende en trigonometrisk funktion af denne vinkel, fortrinsvis  $\operatorname{tg}\alpha(x_k)$ , som reguleringsstørrelse, idet der findes en éntydig relation mellem vinklen  $\alpha(x_k)$  og dennes trigonometriske funktioner.

I en passende optoelektronisk eller mekanoptisk overvågningsindretning 21 overvåges beliggenheden  $x_k$  af krystallisationsfronten af smeltezone 2, og den til stedkoordinaten  $x_k$  - der fortrinsvis er afstanden fra krystallisationsfronten for smeltezone 2 til kimbryllstenen - svarende talværdi i iagttagelsesøjeblikket overføres til en som regnemaskine opbygget datamat 11. Da det fra overvågningsindretningen 21 afgivne signal er et mål for størrelsen af  $x_k$ , er datamaten 11 forsynet med et apparat, som ud fra signalet udleder længden af  $x_k$  som talværdi og med denne talværdi udregner de tilhørende indstillingsværdier for  $d(x_k)$  og  $\alpha(x_k)$ , d.v.s. størrelserne  $d^*(x_k)$  og  $\alpha^*(x_k)$ .

For eksempel kan der til beregning af  $d^*(x_k)$  benyttes udtrykket

$$d^*(x_k) = r_0 + R - (R - r_0) \cos \frac{x_k \pi}{\mu}$$

der også anvendes som grundlag for den tilhørende værdi  $\alpha^*(x_k)$  under hensyntagen til volumenændringen. I udtrykket betegner  $r_0$  radius af kimbryllstenen,  $R$  betegner radius af den tykkere, egentlige stav, og  $\mu$  og  $\pi$  er konstanter. Koordinatovervågningen fra indretningen 21 kan imidlertid også foregå således, at der hver gang, krystallisationsfronten har tilbagelagt en strækning  $s$  på f.eks. 0,5 mm, fremkommer et signal, hvormed de efter et program bestemte værdier af  $d^*(x_k)$  og  $\alpha^*(x_k)$  kaldes frem fra datamaten 11, der i dette tilfælde er opbygget som register. Det er her ved muligt at medgive signaler en anden karakter ved fremadgående bevægelse af krystallisationsfronten end ved tilbagegående bevægelse, så at værdier, der allerede er kaldt frem, ved en tilbagegående bevægelse kan gøres klar til en fornyet fremkaldelse.

En elektrisk spænding, som er proportional med den i det pågældende øjeblik gældende værdi af  $d^*(x_k)$ , føres fra datamaten 11 over en ledning 10b til den ene indgang i det første trin 10 af den første kaskaderegulator, som bestemmer afstanden mellem de to stavholdere 1a og 1b. Samtidigt føres der fra regneenheden 3 til behandling af impulserne fra det elektroniske kamera 20 en spænding, der er proportional med den faktiske værdi af  $d(x_k)$ , til den anden indgang i dette trin via lederen 10a. Indgangstrinnet i denne kaskadereguleringskreds udgøres af en reguleringsforstærker 10, på hvis udgang der optræder en spænding, som er proportional med afvigelsen af  $d(x_k)$ . Denne spænding overføres til det andet reguleringstrin i denne kaskadereguleringskreds. Spændingen når først i integratoren 5 et forstærkerelement, som har til opgave at danne tidsintegralet af reguleringsafvigelsen for  $d(x_k)$  på en sådan måde, at 1.) dette skifter fortegn med regu-

leringsafvigelsen, at 2.) tidsintegralet antager en konstant værdi, så snart reguleringsafvigelsen for  $d(x_k)$  forsvinder, og at desuden 3.) tidsintegralet under forudsætning 2.) er således nomineret, at det er lig med den senere beskrevne, faktiske værdi, så snart  $d^*(x_k)$  skal forblive konstant.

Det af integrationstrinnet 5 dannede signal føres til den ene indgang af reguleringsforstærkeren 4 over en ledning 4b. Til den anden indgang af reguleringsforstærkeren 4 føres der som faktisk værdi en ligeledes ved integration dannet størrelse over ledningen 4a, hvilken størrelse er et udtryk for den øjeblikkelige form og størrelse af smeltezone 2. Fortrinsvis anvendes der her integralet over kvadratsummen af alle med det elektroniske kamera 20 bestemte diameterverdier. I praksis betyder dette, at alle impulser, for så vidt de vedrører billedet af den egentlige smeltezone 2 i kameraet 20, ved multiplikation med den ovenfor nævnte proportionalitetsfaktor omdannes til den tilsvarende diameter-værdi  $d(z)$ , hvorefter regneenheden 3 udregner summen

$$S = \sum_{z_v} (d(z_v))^2$$

og der dannes en elektrisk spænding, som er proportional med den opnåede værdi af  $S$ . Summeringen ved dannelsen af  $S$  sker for alle impulser  $P_v$ , for så vidt de tilhørende billedaftastelinjer  $z_v$  hører til billedet af den egentlige smeltezone 2. Den allerede nævnte indstillingsværdi for reguleringsforstærkeren 4, der afgives fra integratoren 5, skal så normeres således, at den er lig med  $S$ , så snart programmet for  $d^*(x_k)$  foreskriver et trækingsområde med konstant stavdiameter.

Det fra reguleringsforstærkeren 4 afgivne udgangssignal føres til det af den tilbagekoblede reguleringsforstærker 7 dannede tredje reguleringstrin i den kaskade, der danner den første reguleringskreds. Med henblik på tilbagekoblingen er akselen i den af det tredje reguleringstrin drevne drivmotor 8 i stræk-stemme-mekanismen fast koblet til en tachometergenerator 8a, og den fra denne generator afgivne spænding er ført til den frie anden indgang af reguleringsforstærkeren 7. På denne måde fås der stabile omdrejningstal for motoren 8 og en defineret indsats af stræk-stemme-mekanismen.

Til indgangen af den anden kaskadereguleringskreds i apparatet ifølge opfindelsen føres som indstillingsværdi den allerede nævnte indstillingsstørrelse  $\alpha^*(x_k)$  over en ledning 6b, medens den tilhørende, faktiske værdi tilføres over ledningen 6a i form af en med de virkelige værdier proportional spænding. Det første trin i denne anden kaskadereguleringskreds udgøres af reguleringsforstærkeren 6, der tilvejebringer et signal, som er proportionalt med afvigelsen af  $\alpha(x_k)$ . Dette signal tilføres det andet trin i reguleringskaskaden. Dette dannes af en indstillingsmotor 13, et til en ikke vist jævnspændingskilde tilsluttet potentiometer 14 og en reguleringsforstærker 15. PI-reguleringskarakteren for dette trin er givet ved indstillingsmotoren 13, der forandrer udtaget på potentiometeret 14 og dermed den

som indstillingsværdi over potentiometeret 14 afgivne jævnspænding. Den faktiske værdi fås fra den af kondensatoren 12a og induktionsvarmespolen dannede svingningskreds. Den skal være et mål for den til svingningskredsen og derfor til induktionsvarmespolen påførte energi.

Den over kondensatoren 12a liggende højfrekvente vekselspænding giver efter ensretning og eventuel udglatning i trinnet 24 en spænding  $U_e$ , der kan aflæses på voltmeteret 22 og er et mål for den energi, der optages af svingningskredsen. Spændingen tilføres over ledningen 15b til den ene indgang i reguleringsforstærkeren 15. På den anden indgang findes den af potentiometeret 14 afgivne spænding som indstillingsværdi.

Motoren 13 træder i aktion, så snart der optræder en reguleringsafvigelse for  $\alpha(x_k)$ . Er denne lig med nul, skal der på forstærkeren 15 være ligevægt mellem den fra potentiometeret 14 afgivne indstillingsværdi og den fra trinnet 24 afgivne spændingsværdi  $U_e$  som faktisk værdi, hvilket let kan opnås ved tilsvarende indstilling af potentiometerudtaget. Dersom energitilførslen fra generatoren 18 eller koblingen mellem smeltezone 2 og induktionsvarmespolen 12 ændrer sig, ændres spændingen  $U_e$  og desuden også den faktiske værdi af  $\alpha(x_k)$ . Reguleringstrinene 6 og 15 træder da i aktion i så lang tid, at der igen bliver ligevægt på trinnet 15, og reguleringsafvigelsen af  $\alpha(x_k)$  er forsvundet.

Udgangen fra det andet reguleringsstrin 15 i den anden kaskadereguleringskreds er videreførbundet til et tilbagekoblet tredje reguleringsstrin med reguleringsforstærkeren 16, hvis udgang påvirker indstillingsmotoren 17 til indstilling af generatoren 18. Tilbagekoblingen er tilvejebragt med modstanden 23, der påtrykker udgangssignalet fra reguleringsforstærkeren 16 på den anden indgang af reguleringsforstærkeren 16. Her findes der i modsætning til tilbagekoblingsforholdene ved den første kaskadereguleringskreds ingen tachometergeneratortilbagekobling, men en ankerspændingstilbageføring, som i dette tilfælde er tilstrækkelig.

Sammenfattende skal det på tegningen viste apparat endnu en gang beskrives kortfattet med hensyn til virkemåde.

I det elektroniske kamera (fjernsynskamera) 20, hvormed der optages et billede af smeltezone 2, sker der en elektronisk aftastning af dette billede, således som dette for eksempel er beskrevet i patentansøgning nr. 1320/72. Der fås for hver aftastecyklus en række af diskrete elektriske impulser (firkantimpulser) hørende til de enkelte billedaftastningslinjer. Disse impulser tilføres en elektronisk udnyttelsesindretning 3, hvori der foretages de fornødne regneoperationer til ud fra de nævnte impulser at beregne diameteren  $d(x_k)$  (den faktiske værdi) af krystallisationsfronten for smeltezone, randvinklen  $\alpha(x_k)$  og den til reguleringsforstærkeren 4 nødvendige sum  $S = \sum_V (d(z_V))^2$ . Herved er længden af impulserne  $P_V$  (tidsvarigheden) den afgørende størrelse, og amplituderne (impulshøjden) tjener blot til at finde frem til de forskellige impulser, specielt til den til krystallisationsfronten og

dermed til diameteren  $d(x_k)$  hørende impuls  $P_k$  og til den ovenfor nævnte, til diameteren  $d(x_k + \lambda)$  svarende naboimpuls.

Endvidere indføres eventuelt de i udnyttelsesindretningen 3 dannede "faktiske værdier" til styring af programmet også i datamaten 11, hvilket er antydnet ved forbindelsesledningen 3a.

Datamaten 11 afgiver de til indgangstrinnene i de to kaskadereguleringskredse nødvendige indstillingsværdier  $d^*(x_k)$  og  $\alpha^*(x_k)$ , der kaldes frem ved styring fra stedet  $x_k$  for krystallisationsfronten af smeltezone 2. Reguleringsafvigelsen i den første kaskadereguleringskreds, som tjener til regulering af afstanden mellem de to holdere 1a og 1b for den halvlederstav 1, der skal zonesmeltes, opbygges ved tidsintegration til en indstillingsstørrelse, som kun bringer bevægelsen af indstillingsmotoren 8 til at ophøre, når diameteren af den fra smeltezone 2 voksende stav skal forblive konstant, og der ikke findes nogen reguleringsafvigelse. Den tilhørende, faktiske værdi er den med volumen af smeltezone 2 eller med en iagttagelig del af dette volumen, der skal støde op til krystallisationsfronten, proportionale sum

$$S = \sum (d(z_v))^2.$$

På lignende måde sker påvirkningen af energitilførslen til induktionsvarmespolen 12 ved hjælp af den anden kaskadereguleringskreds i apparatet ifølge opfindelsen. Den styrer med den på indgangsforstærkeren liggende reguleringsafvigelse af randvinklen  $\alpha(x_k)$  en anden reguleringsforstærker over en indstillingsmotor 13, der i integrationsvirkning ligner integratoren, og som reguleringsstørrelse for det andet trin i denne kaskade anvendes energitilførslen til induktionsvarmespolen 12. Medens der som reguleringsføler til dannelse af summen S anvendes et elektronisk kamera 20, er der her anvendt en anden reguleringsføler, nemlig det ensrettende og spændingsudglattende trin 24. Også her er der anvendt et tilbagekoblet udgangstrin 16, som ved hjælp af motoren 17 indvirker på reguleringsstrækningen, det vil i dette tilfælde sige frekvensen af generatoren 18. Også her bliver omdrejningstallet for indstillingsmotoren 17 omtrent proportional med reguleringsafvigelsen af energien som følge af den med modstanden 23 tilvejebragte tilbagekobling.

Programmet til indstillingsværdierne  $d^*(x_k)$  og  $\alpha^*(x_k)$  vælges i hvert tilfælde således, at det stemmer overens med stabiliteten af smeltezone 2.

#### P A T E N T K R A V

1. Fremgangsmåde til digelfri zonesmeltning af en i holdere lodret holdt halvlederstav, ved hvilken smeltezone, der føres gennem halvlederstavens, overvåges ved hjælp af et fjernsynskamera, og hvor de af fjernsynskameraet afgivne, elektriske impulser anvendes som mål for de med de enkelte billedlinier overensstemmende diametre af det i fjernsynskameraet tilvejebragte smeltezonebillede, af hvilke impulser der afledes er-værdier, der tilføres dels i det mind-

ste én reguleringskreds, der indvirker på afstanden mellem de to holdere, der bærer halvlederstaven, dels en anden reguleringskreds til regulering af opvarmningen, i hvilken anden reguleringskreds der som reguleringsstørrelse foruden diameteren af smeltezonens ved størkningsfronten anvendes i det mindste endnu en af impulserne fra fjernsynskameraet afledt størrelse, som er kendetegnende for smeltezonens geometri, såsom volumen og vinkel mellem tangenter i karakteristiske punkter af smeltezonens profil i forhold til lodret retning,

k e n d e t e g n e t ved, at den ved sammenligning af diameteren af smeltezonens med dennes b $\ddot{o}$ r-værdi dannede reguleringsafvigelse tilføres over en integrator til den ene indgang af en reguleringsforstærker og sammenlignes i denne med den af impulserne fra fjernsynskameraet afledte kvadratsum over billed-diameterne af smeltezonens, hvorpå den ved sammenligningen dannede reguleringsafvigelse benyttes til regulering af afstanden mellem de to stavholdere, og ved at i det mindste én af vinklerne for de nævnte tangenter til smeltezonens profil sammenlignes med vinklens b $\ddot{o}$ r-værdi, og den derved dannede reguleringsafvigelse anvendes til regulering af smeltezonens opvarmning i retning af at formindske denne reguleringsafvigelse.

2. Apparat til automatisk regulering af digelfri zonesmeltning af en i holdere fastholdt halvlederstav til udøvelse af fremgangsmåden ifølge krav 1 med et fjernsynskamera (1), der overvåger smeltezonens, med en regneenhed (3), der foretager udregninger på grundlag af de fra fjernsynskameraet afgivne, elektriske impulser, og med flere reguleringskredse, der tilføres de af regneenheden udregnede er-værdier og indvirker dels på afstanden mellem de to holdere for halvlederstaven, dels på opvarmningen af smeltezonens, k e n d e t e g n e t ved en b $\ddot{o}$ r-værdigiver (11), der afgiver b $\ddot{o}$ r-værdien for diameteren af smeltezonens (2) ved størkningsfronten til den ene indgang af en første reguleringsforstærker (10), hvis anden indgang tilføres den fra regneenheden (3) afgivne, tilsvarende er-værdi, medens den af denne reguleringsforstærker dannede reguleringsafvigelse over et integrationstrin (5) tilføres den ene indgang til en anden reguleringsforstærker (4), hvis anden indgang tilføres den af regneenheden (3) udregnede kvadratsum over er-værdierne af smeltezonens diameter, og den herved tilvejebragte, og på udgangen af denne anden reguleringsforstærker (4) optrædende reguleringsafvigelse via et tredje reguleringstrin (7) bringes til at indvirke på en indstillingsmotor (8), der igen indvirker på en mekanisme (9), der bestemmer afstanden mellem de to stavholdere, samt ved at de fra regneenheden (3) afgivne er-værdier vedrørende i det mindste én vinkel for karakteristiske tangenter til smelteprofilen tilføres en anden reguleringskreds (6), der samtidigt får tilført den eller de fra b $\ddot{o}$ r-værdigiveren (11) afgivne b $\ddot{o}$ r-værdier for denne eller disse karakteristiske tangenters vinkler, og den i denne reguleringskreds (6)

tilvejebragte reguleringsafvigelse føres videre til regulering af indstillingen af energikilden, der opvarmer smeltezonen (2).

3. Apparat ifølge krav 2, k e n d e t e g n e t ved, at reguleringskredsen (6), der er sammenkoblet med opvarmningen af smeltezonen (2), indeholder flere trin, og ved at det af er-værdien og bør-værdien for den karakteristiske vinkel styrede, første reguleringstrin (6) indvirker på en hjælpespændingsregulator i form af en indstillingsmotor (13) og et med jævnspænding fødet potentiometer (14), hvis udtag indstilles af indstillingsmotoren (13), når der i reguleringskredsen optræder en reguleringsafvigelse, hvor den fra hjælpespændingsregulatoren på udtaget aftagne hjælpespænding tilføres som bør-værdi til et efterfølgende reguleringstrin (15), medens den tilhørende er-værdi aftages over en ensretterkobling (24) fra varmemstrømkredsen, der induktivt opvarmer smeltezonen (2).

4. Apparat ifølge krav 3, k e n d e t e g n e t ved, at udgangen fra det nævnte efterfølgende reguleringstrin (15) indvirker over et tilbagekoblet tredje reguleringstrin (16) på en indstillingsmotor (17) som ved hjælp af varmemstrømkredsens frekvensindstilling (18) styrer energitilførslen til smeltezonen (2).

Fremdragne publikationer:

Danske ansøgninger nr. 1320/72 (patent nr. 140822), 2125/73.

