(19) DANMARK

DIREKTORATET FOR
PATENT- OG VAREMÆRKEVÆSENET

(12) **FREMLÆGGELSESSKRIFT** (11) 145770 **B**

(21) Ansøgning nr. 925/79
(22) Indleveringsdag 6. mar. 1979
(24) Løbedag 6. mar. 1979
(41) Alm. tilgængelig 7. sep. 1980
(44) Fremlagt 21. feb. 1983
(86) International ansøgning nr. -
(86) International indleveringsdag -
(85) Videreførelsesdag -
(62) Stamansøgning nr. -
(30) Prioritet -

(51) Int.Cl.³ H 05 B 6/40
C 30 B 13/20

(71) Ansøger TOPSIL A/S AF 1981, 3600 Frederikssund, DK.

(72) Opfinder Noel DeLeon, DK.

(74) Fuldmægtig Patentbureauet Hofman-Bang & Boutard.

(54) Induktionsopvarmningsspole til flydende zonesmeltning af krystallinsk materiale.

SAMMENDRAG 925-79

Induktionsspole til zonesmeltning
(fig.3)

En induktionsspole (18) til zonesmeltning kan fremstilles ved at et massivt ringformet legeme forsynes med et gab (26) således at spolen danner en enkelt vinding. Når en sådan spole påtrykkes radiofrekvent strøm, vil strømmen flyde i spolens overflader. Ved at udsave spor eller åbninger (34) i spolens overflader kan man ændre strøm- og dermed temperaturfordelingen. Strømfordelingen kan fastlægges uafhængigt for spolens top- og bundflade. En eller flere åbninger (34) kan udfyldes med strimler af ledende materiale til annullering af åbningens (34) indvirkning på strømfordelingen.

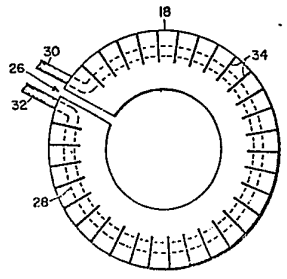


FIG. 3

DK 145770 B

Den foreliggende opfindelse angår en induktionsopvarmningsspole af den i krav 1's indledning angivne art, som er velegnet til flydende zonesmeltning af store, højkvalitetskrystaller af halvledermateriale.

Flydende zonesmeltning anvendes til omdannelse af polykrystallinsk materiale til en højkvalitets mono-krystallinsk stang, til fjernelse af uønskede urenheder fra materialet og samtidigt til fordeling af doteringsatomer ensartet igennem hele krystallen. Ved flydende zoneprocessen bringes en smal smeltezone til at bevæge sig langsomt i længderetningen af en lodret anbragt stang af krystallinsk materiale. Idet den smeltede zone bevæger sig, kan materialet umiddelbart bag ved zonen bringes til genstørkning som monokrystallinsk materiale. Den monokrystallinske vækst initieres ved hjælp af en enkeltkrystalkim, og væksten fortsætter af sig selv ud fra denne kim. Idet den smeltede zone bevæger sig, fejer den også urenheder med sig og fordeler doteringsatomer, hvorved materialet bag ved zonen efterlades i en mere ren og ensartet doteret tilstand.

Den smeltede zone bringes til at vandre i den polykrystallinske stangs længderetning ved at bevæge stangen lodret forbi et stationært opvarmningsorgan, såsom en radiofrekvent induktionsspole, der omgiver materialet. Denne smeltede zone er uunderstøttet og holdes alene i stilling på grund af overfladespænding og elektromagnetiske kræfter. Eftersom zonen ikke er understøttet, som f.eks. ved kontakten med væggene i en smeltedigel, er zonens størrelse og form yderst kritisk. Hvis zonen bliver for bred, vil de elektromagnetiske og overfladespændingskræfterne ikke være i stand til at afgrænse den store mængde af smeltet materiale, og det smeltede materiale vil blive kastet af under tyngdekraftens indflydelse. Hvis derimod den smeltede zone har en for begrænset udstrækning, vil

den centrale del af materialet ikke blive fuldstændigt smeltet, hvilket resulterer i en dårlig krystalkvalitet. Den kritiske form af den smeltede zone kontrolleres af fordelingen af den strøm, der induceres i stangen, og denne er på sin side primært fastlagt af udformningen og dimensionerne af induktionsspolen, der anvendes til dannelse af zonen.

Der kendes en lang række forskellige spoler omfattende såvel enkeltvindings- som multipelvindingsspoler. Disse sidste kan have flere parallelle vindinger, eller spolen kan være helix-formet. Spolerne kan være formet af cylindriske rør eller kan være tilvirkede i en flad "pandekage"-form. Alle de forskellige geometriske konfigurationer er udformet til fordeling af strømmen på en sådan måde, at der tilvejebringes den nødvendige opvarmning af stangens samlede tværsnit og opnås en stabilisering af smelten.

Disse forskellige kendte spoleudformninger har vist sig ikke at være helt tilfredsstillende navnlig ved zonesmeltning af krystaller med stor diameter. En ofte anvendt spole er fremstillet af to parallelle vindinger af rør. En af vindingerne er mindre end den anden, og vindingerne er anbragt over hinanden. Denne konfiguration af koncentriske spoler bidrager til understøttelse og stabilisering af smelten og sikrer, at smeltning af materialets samlede tværsnit finder sted. Spoler formet af cylindriske rør er imidlertid vanskelige at udforme præcist og kan let blive bøjede ud af den ønskede form, især når spolen er ny, og spolematerialet er blødt. Yderligere er strømmen naturligvis begrænset til spolens vindinger, og strømmen er derfor fordelt i diskrete trin. Strømmen kan derfor ikke variere jævnt fra den smeltede zones top til bund.

Spoler af den flade "pandekage"-formede type kan være til-

virket ud fra et stykke af en massiv blok og kan derfor fremstilles under overholdelse af snævre dimensioneringstolerancer. Sådanne spoler er også mere vægtige og robuste end spoler af rørtypen og er derfor mindre udsatte for tilfældig deformation. Men "pandekage"-spolerne er mindre fleksible, hvad udformningen angår, eftersom strømmene er ligeligt fordelt over alle spolens flader. Specielt kendes der ikke spoler, der muliggør en uafhængig fastlæggelse af strømfordelingen på spolens top- og bundflade, og en simpel ændring af en én gang fastlagt strømfordeling.

Fra DE-patentskrift nr. 909.380 kendes en pandekageformet induktionsspole, hvor den centrale del består af et materiale med en større elektrisk ledningsevne end den øvrige del således, at man kan få strømmen til at løbe særlig tæt på det emne, der skal opvarmes. Skriftet omtaler ikke induktionsopvarmning af krystallinsk materiale, og den én gang fastlagte strømfordeling kan ikke ændres.

Fra DE-patentskrift nr. 965.445 kendes en induktionsspole til opvarmning af metalgenstande, hvori man til reduktion af spolens ledende tværsnit har udformet gennemgående slidser. Også disse spoler vil være bundet til den én gang fastlagte strømfordeling, og denne kan ikke varieres uafhængigt af top- og bundfladen. En nyere konstruktion, der er tilpasset digelfri zonesmeltning af krystallinsk materiale er beskrevet i DE offentliggørelsesskrift nr. 25 38 854, hvor man til opnåelse af en ensartet feltfordeling har forsynet spolen med et antal gennemgående spalter.

På denne baggrund foreligger der et behov for en forbedret radiofrekvent induktionsspole til flydende zonesmeltning af krystallinske materialer, hvor problemerne og begrænsningerne knyttet til spoler ifølge den hidtil kendte teknik er overvundne.

Det er den foreliggende opfindelses formål at tilvejebringe en radiofrekvent induktionsopvarmningsspole af den i indledningen angivne art, som kan fremstilles let og reproducerbart, og hvor strømfordelingen over spolens overflader kan fastlægges uafhængigt af hinanden og kan varieres, hvorved temperaturfordelingen i materialestangen kan forbedres. Dette opnås som anført i krav 1's kendetegnende del ved, at der i spolens top- og bundflader er udsavet et antal spor. Udtrykket "spor" skal her forstås i sin traditionelle betydning og omfatter således ikke spalter eller slidser, der gennembryder spolen fra top til bund. Flydende-zone-induktionsspolen ifølge opfindelsen kan fremstilles ved bearbejdning af et massivt stykke af elektrisk ledende materiale til en flad "pandekage"-formet spole. En fladbundet rille er udformet i spolen til optagelse af et rørstykke, som svejses eller loddes til furen til tilvejebringelse af vandkøling af spolen. Strømfordelingen gennem spolen fastlægges ved udsavning af spor i spolens overflade. De udsavede spor tjener til styring af strømmen, idet denne begrænses til de områder af spolen, der ikke er forsynet med udsavede spor. Strømfordelingen over spolens top- og bundflader kan således fastlægges uafhængigt ved hjælp af det særlige arrangement af udsavede spor i hver flade. Når der en gang er blevet tilvejebragt et givet arrangement af udsavede spor, kan dette ændres blot ved at udforme en rille i spolens overflade og anbringe et massivt stykke elektrisk ledende materiale i rillen. Dette massive stykke ophæver dermed virkningen af de tidligere udsavede spor. Alternativt kan et massivt stykke af ledermateriale svejses eller på anden måde fastgøres til spolens overflade enten til ophævelse af virkningen af de underliggende udsavede spor eller til forøgelse af den pågældende del af spolens strømbærende evne.

Opfindelsen illustreres nærmere nedenfor under henvisning

til tegningen, hvor:

Fig. 1 perspektivisk viser en type induktionsopvarmningsspole ifølge den kendte teknik;

Fig. 2 set fra siden viser en udførelsesform for en induktionsopvarmningsspole ifølge opfindelsen;

Fig. 3 viser den på fig. 2 viste spole set fra oven;

Fig. 4 viser den på fig. 2 viste spole set fra neden; og

Fig. 5 perspektivisk viser en alternativ udførelsesform for en spole ifølge opfindelsen.

På fig. 1 er vist en spole 10, som er typisk for den kendte teknik. Spolen består af to koncentriske vindinger, en mindre topvinding 12 og en større bundvinding 14. Vindingerne 12, 14 kan være udformet af kobberrør eller andet elektrisk ledende materiale. De to vindinger er sammenføjet ved et sammenføjningssted 16, således at de er koblet parallelt. Spolens fælles ender 17, 19 er forbundet såvel til en radiofrekvent energikilde som til et vandkølingssystem. Der ledes vand igennem spolens hule rør for at holde vindingerne kolde, da de vil befinde sig i umiddelbar nærhed af det smeltede krystallinske materiale. De to vindinger sikrer, at der bliver overført tilstrækkelig energi til det krystallinske materiale til smeltning af materialets samlede tværsnit. Den mindre vinding 12 står i induktiv forbindelse med smeltens centrale del, mens den større vinding 14 står i forbindelse med smeltens ydre del, så der tilvejebringes en passende formet smeltningsgrænseflade. De to vindinger 12, 14 samvirker til stabilisering af smelten; med kun én vinding ville den voksende krystal have tendens til at glide spiralformet af i

en ukontrollerbar retning.

På fig. 2 er i tværsnit vist en radiofrekvent induktionsspole 18 ifølge opfindelsen. Spolen 18 er vist sammen med en siliciumstang, der forædles ved flydende zonesmeltning. Den foretrukne udformning beskrives i det følgende i forbindelse med flydende zoneforædling af en siliciumstang af en bestemt størrelse, men opfindelsen finder tilsvarende anvendelse på andre krystallinske materialer og andre dimensioner.

En tilført polykrystallinsk siliciumstang 20, som i diameter er ca. 50 - 80 mm, omsættes ved den digelfri forædlingsproces til en monokrystalstang 22, som er ca. 75 - 110 mm i diameter. Siliciummaterialets smeltede zone 24 snævres ind til en mindre diameter til passage igennem spolen 18's centrum. Den smeltede zone opvarmes af strømme induceret i stangen af induktionsspolen 18. Spolen kan f.eks. være 10 - 15 mm tyk ved den ydre kant og indsnævres til en tykkelse på nogle få tiendedele af en mm ved centret. De øvrige på figuren viste detaljer forklares nærmere i forbindelse med de følgende figurer.

På fig. 3 er induktionsspolen 18 vist set fra oven. Spolen 18, der er toroideformet, kan være fremstillet af kobber, sølv eller andet elektrisk ledende materiale. Spolen 18's udvendige diameter kan f.eks. være ca. 90 - 140 mm, og den centrale åbnings diameter kan være ca. 20 - 35 mm, hvor åbningen kan være cirkulær, oval eller have en anden form afhængigt af det materiale, der skal smeltes. En gennemgående slids 26 er udskåret i spolen 18, således at spolen danner en enkelt vinding, som i det væsentlige omgiver det krystallinske materiale. Til køling af spolen er der udformet en rille 28 i spolens overflade, vist punkteret på tegningen. I denne rille er der nedpresset et stykke rør 29 med ender 30 og 32. Røret kan f.eks. være

et 5 mm kobberrør. Røret er sølvloddet eller svejset til rillen 28, og spolen 18's overflade er poleret jævn. Under brugen er kobberrørets ender 30, 32 forbundet til en kilde for strømmende vand samt til en radiofrekvent energikilde, af hvilke ingen er vist. Vandkølinqen er påkrævet for at hindre spolen 18 i smeltning som følge af de høje strømtætheder i spolens overflade.

Fra den radiofrekvente energikilde løber der strøm ind i spolen 18. Strømfordelingen i spolen kan ifølge opfindelsen fastlægges ved selektivt at udsave et antal spor 34 i spolens topflade. Ved fastlæggelse af strømfordelingen er det muligt at styre det elektriske feltmønster og hermed fordelingen af den strøm, der induceres i siliciumstangen. Ved radiofrekvenser af interesse for flydende zonesmeltning (omkring 2 - 5 MHz) er strømmens indtrængningsdybde i kobberet mindre end 0,05 mm, og hovedsagelig al strømmen løber således i spolens overflade. Således er et udsavet spor 34 med 1 mm bredde og 1-2 mm dybde effektivt til en lokal forøgelse af den elektriske impedans. Det er blevet fastslået, at ca. 20 - 50 radialt rettede udsavede spor 34 i spolens yderflade effektivt kan fastlægge strømfordelingen. Sporene kan være anbragt med ensartet indbyrdes afstand langs spolens periferi eller kan være anbragt asymmetrisk til tilvejebringelse af en bestemt fordeling. Til opvarmning af den centrale del af stangen 20 og som hjælp til stabilisering af smelten kan de udsavede spor 34 på spolens topflade være rettet mod spolens ydre periferi og kan strække sig ud over spolens ydre kant, mens spolens indvendige del er fri for udsavede spor. Ved dette arrangement af spor 34 tvinges strømmen mod spolens centrum og efterlader spolens ydre del relativt fri for strøm. De udsavede spor 34 kan f.eks. strække sig fra ca. 80 mm fra spolens centrum til spolens yderkant.

På fig. 4 er spolen 18 vist set fra neden. Strømfordelingen på spolens bundflade er fastlagt på lignende måde som i topfladen ved hjælp af udsavede spor 36. De udsavede spor 36 behøver ikke at være identiske med sporene 34 i spolens topflade. Strømfordelingen i spolens top og bund kan således fastlægges uafhængigt af hinanden ved passende anbringelse af sporene 34 og 36. I det beskrevne eksempel er det blevet fundet hensigtsmæssigt at udsave 30 - 40 med ensartet indbyrdes afstand anbragte, radialt foløbende åbninger 36, der strækker sig fra ca. 20 mm fra spolens centrum til ca. 40 mm fra centret. Strømmen begrænses herved til de indvendige og udvendige områder af spolen 18's bund og er udelukket eller reduceret i den midterste del.

På fig. 5 er der vist en alternativ udførelsesform for en flydende-zone-induktionsspole 18 med udsavede spor 34 i topfladen og sidefladen til tilvejebringelse af en bestemt strømfordeling. Udover de udsavede spor er der imidlertid anvendt en yderligere teknik til ændring af strømfordelingen. De udsavede spor bevirker en forøgelse af overfladeimpedansen i visse områder af spolen; i andre områder af spolen er impedansen sænket ved påsvejsning af massive strimler 38 af elektrisk ledende materiale på spolens overflade til lokal forøgelse af strømtætheden. Dette kan f.eks. ske ved at udforme et spor i spolens overflade, og svejse en massiv strimmel 38 af kobber eller andet ledende materiale ind i denne åbning. Strimlen 38 kan være i flugt med spolens overflade eller kan rage op eller kan være forsænket i forhold til overfladen alt efter den ønskede indvirkning på strømtætheden. Anvendelse af strimlerne 38 kan være nyttig til eksperimentel bestemmelse af den mest korrekte placering af de udsavede spor 34. Såfremt det f.eks. kan fastslås, at de udsavede spor strækker sig for langt i radial retning, kan den uønskede ende af de udsavede spor jævnes, og en strimmel 38 kan anbringes til retablering af spolens overflade til i det væsentlige

samme tilstand som før udsavningen. Af større betydning er det imidlertid, at strimlerne 38 giver en yderligere fleksibilitet ved fastlæggelsen af den ønskede strømfordeling. Det har vist sig særligt ønskeligt på spolen 18's topflade at anbringe en strimmel 38, der er koncentrisk med spolen, der har en indvendig diameter på ca. 50 - 60 mm, og en udvendig diameter på ca. 80 - 85 mm, og som rager ca. 2 mm op over spolen 18's oprindelige overflade. En sådan strimmel 38 muliggør langt større fleksibilitet for diameteren af den tilførte stang 20, der skal behandles ved zonesmeltningsprocessen.

Strimlen 38 er på fig. 5 vist sammen med udsavede spor 34 i spolens topflade. I andre tilfælde kan det være ønskeligt at anvende sådanne strimler på bundfladen eller på begge overfladerne. Strimlerne kan anvendes i forbindelse med udsavede spor eller kan anvendes alene.

P a t e n t k r a v

1. Induktionsopvarmningsspole af den flade "pandekage"-formede type til flydende zonesmeltning af krystallinsk materiale, hvilken spole omfatter en enkelt, vandkølet vinding af elektrisk ledende materiale, der hovedsageligt omgiver det krystallinske materiale, og har top-, bund- og sideflader, k e n d e t e g n e t ved, at omfatte et antal udsavede spor (34,36) i top- og bundfladerne.

2. Induktionsopvarmningsspole ifølge krav 1, k e n d e - t e g n e t ved, at de udsavede spor (34,36) i overfladerne forløber radialt.

3. Induktionsopvarmningsspole ifølge krav 1 eller 2 til digelfri smeltning af halvledermateriale, k e n d e t e g - n e t ved, at de udsavede spor (34) i spolens (18) topflade er anbragt nær ved dennes ydre periferi, mens sporene (36) i spolens bundflade er anbragt nær den centrale del, og at en koncentrisk strimmel (38) af elektrisk ledende materiale er fastgjort til og ragende op over spolens topflade.

4. Induktionsopvarmningsspole ifølge krav 3, k e n d e - t e g n e t ved, at de udsavede spor (34,36) er omkring 1 mm i bredden og 2 mm i dybden.

5. Induktionsopvarmningsspole ifølge krav 1-4, k e n - d e t e g n e t ved, at der i nogle af sporene er anbragt disse udfyldende metallederstrimler.

Fremdragne publikationer:
DE off.g.skrifter nr. 2357638, 2422077, 2527010, 2538854
DE freml.skrift nr. 1809847
DE patenter nr. 909380, 969445.

FIG. 1

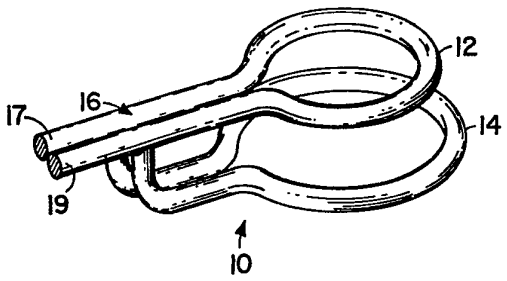
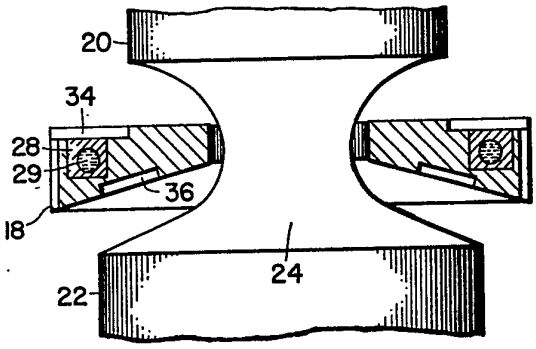


FIG. 2



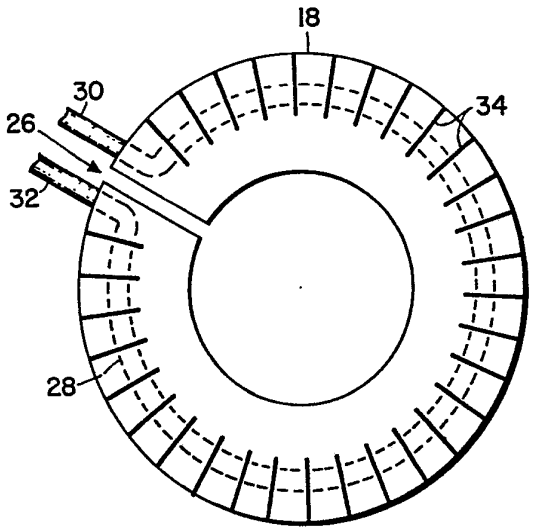


FIG. 3

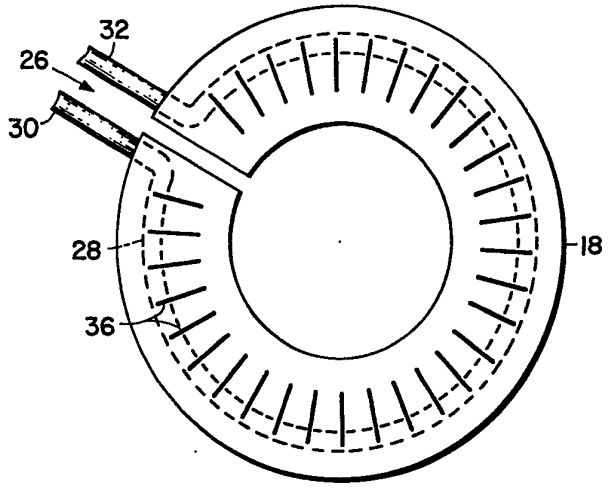


FIG. 4

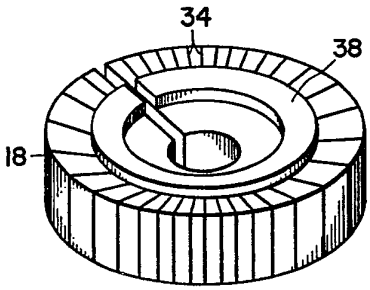


FIG. 5