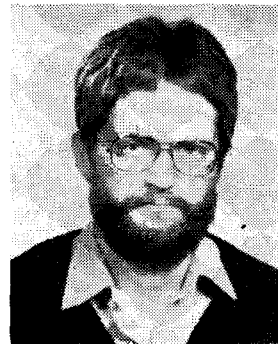


Szigetelő alapú integrált áramkörök ellenállásainak lézeres értékbeállítása

PATAKI BÉLA
REMIX



PATAKI BÉLA

1981-ben szerzett villamosmérnöki oklevelet a Budapesti Műszaki Egyetem Villamosmérnöki Karának elektronikai technológia szakán. Azóta

a BEMIX áramköri főosztályán dolgozik gyártásfejlesztőként. Jelenleg a vékony- és vastagréteg áramkörök ellenállásainak programvezérelt lézeres értékbeállításával foglalkozik.

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk áttekintést ad a lézeres értékbeállításról. Összehasonlítja más technológiákkal, bemutatja a vágások geometriai alakzatait, ismerteti a változtatható paramétereket és hatásukat. Végül egy konkrét berendezés példáján tárgyalja az értékbeállító gépek felépítését, működését.

A szitanyomtatással készülő vastagréteg és a vákuumgőzöléssel készülő katódporlasztással készülő vékonyréteg ellenállások nem gyárthatók olyan pontossággal, mint amire a kész áramkörökben rendszerint szükségünk van. Az értékbeállítás során ebből a nagy szórású „alapérték”-halmazból olyan kis szórású „végérték”-halmazt állítunk elő, amelynek elemei a névleges érték tűrésmézején belül vannak és a használat során is belül maradnak.

1. Értékbeállítási módszerek

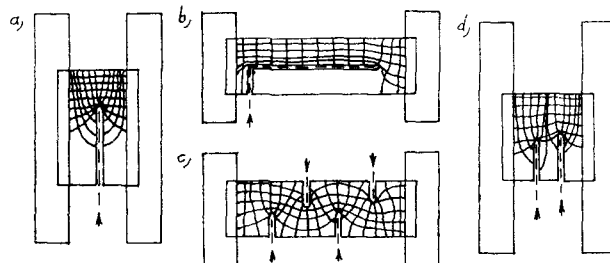
Jelenleg az alábbi technológiákat használják elterjedten:

- vastagréteg — homokfúvásos vágás
 - lézeres vágás
- vékonyréteg — hőkezelés (Joule-hővel vagy hőközléssel)
 - anódos oxidálás (csak tantálnitrid réteghez)
 - elektroeróziós vágás
 - lézeres vágás

Az irodalomban egyéb módszerek is találhatók, de jóval ritkábban használják őket, mint az itt felsoroltakat. Hőkezeléssel az ellenállás értéke csökkenthető vagy növelhető is, míg a többi módszerrel csak növelni lehet. Ez utóbbi eljárásokhoz a névlegesnél alacsonyabb várható értékű alapérték-halmazt kell tervezni és gyártani. Annyival alacsonyabbat, hogy nagy valószínűséggel ne legyen közöttük túl magas értékű példány, de ne is kelljen sokat állítani rajtuk.

Lézeres értékbeállítás („trimmelés”) során egy vagy több helyen belevágunk az ellenállásrétegbe (a rétegnek a hordozóról kb. 50 μm széles csíkban való elpárologtatásával), így az ellenállás hosszúság/szélesség viszonyát növelve megnöveljük az érték-

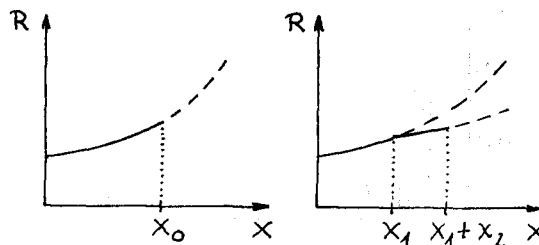
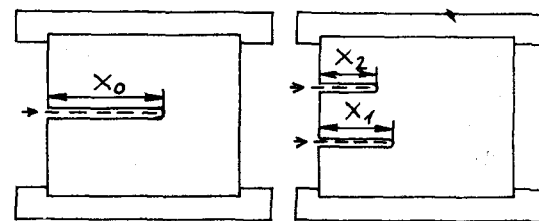
két. Ez a technológia jelenleg a legtermelékenyebb, tiszta, könnyen automatizálható, és az egyetlen a felsoroltak közül, amely mindkét fajta áramkörhöz használható.



H994-1

1. ábra. Jellegzetes vágatformák az ekvipotenciális és az áramvonalakkal [5]

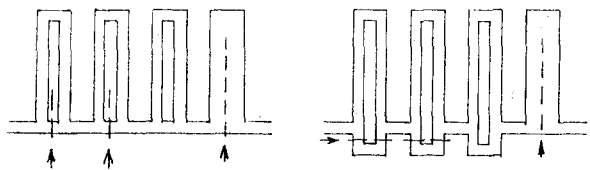
a) egyenes, b) L-alakú, c) szerpentin, d) dupla



H 994-2

2. ábra. Értékváltozás a vágathossz függvényében [4]

Beérkezett: 1984. VI. 14. (Δ)



H994-3

3. ábra. Vékonyréteg ellenállások durva és finom beállítása

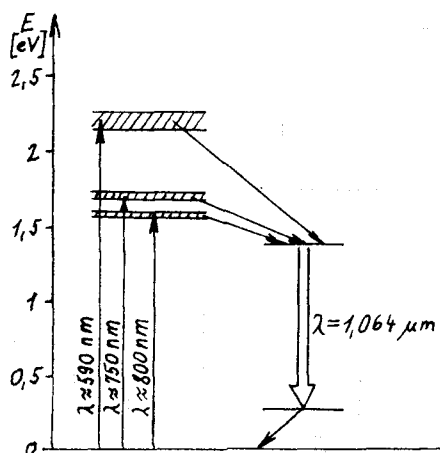
2. Vágási alakzatok

A vágatformákat egyrészt az 1. ábrán látható módon az ellenállások alakja, másrészt a kívánt pontosság alapján választjuk meg. Ugyanis az ellenállás értéke nem lineárisan változik a lézersugár előrehaladásának (azaz a vágás hosszának) függvényében, amint a 2. ábra mutatja. Kettős vagy L -alakú vágással kisebb dR/dx meredekséggel érjük el a végértéket, ami pontosabb leállást tesz lehetővé. Nagy teljesítményű ellenállások esetén jobb stabilitást is várhatunk a vágatok végződésénél fellépő alacsonyabb áramsűrűséggel járó kisebb Joule-hős hőkezelés és kevésbé számottevő anyagvándorlás következtében.

Vékonyréteg ellenállások esetén a (fokozatonkénti durva beállításra szolgáló) meandereket áthidaló rövidzárat is a lézeres értékbeállítás során vágjuk át kellő számban, majd utána a már bemutatott vágatformák valamelyikével állítjuk be finoman a kívánt végértéket (l. 3. ábra).

3. Megmunkáló szerszámunk

Megmunkáló szerszámunk, a lézersugár — mint ismeretes — kis veszteségű, pozitív visszacsatolású optikai rezonátorban létrehozott monokromatikus, koherens, kis divergenciájú fény. Ez utóbbi tulajdonsága miatt jól fókuszálható, így energiasűrűsége alkalmas teszi szinte bármilyen anyag mikromegmunkálására. Értékbeállító lézerekben aktív anyagként

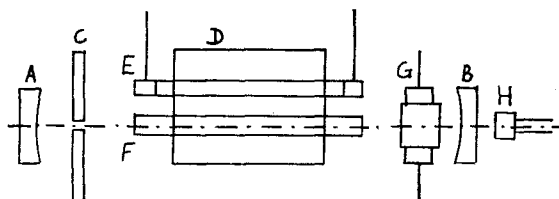


H994-4

4. ábra. Nd energia-szintjei [1]

neodímiomot használnak, $Y_3Al_5O_{12}$ kristályba ágyazva, mely anyagra az $Nd:YAG$ (Yttrium-Alumínium-Garnet) jelölés terjedt el. A neodímiium energiaszintvázlatát a 4. ábra szemlélteti. A lézerátmenethez tartozó hullámhossz $1,064 \mu m$, amely az infravörös tartományba esik. Vékony és vastagréteg ellenállásanyagok elpárologtatására ez a hullámhossz egyaránt megfelel. A gerjesztéshez („pumpálásához”) tartozó hullámhosszak a látható tartományba esnek, erre a célra kripton ívlámpa használatos.

Az optikai rezonátor vázlatát az 5. ábrán látható. A lámpa és a lézerkristály egy tükrös falú elliptikus henger két gyújtóvonalában helyezkedik el a minél jobb gerjesztési hatások végett. A két rezonátortükrök közül az egyik részben átereszt, itt kapjuk a megmunkáló sugarat. A másik tükrön is áthatol az infravörös fény egy igen csekély hányada (amelynek intenzitása arányos a kilépő sugáréval), ezért a mögé helyezett detektorral mérhetjük a teljesítményt.



H994-5

5. ábra. Szilárdtest lézer-rezonátor [1] [6]

- A: részben áteresztő (kilépő) tükrök
- B: tükrök
- C: fényrekesz
- D: elliptikus henger
- E: pumpáló fényforrás
- F: lézerkristály
- G: Q-kapcsoló
- H: detektor

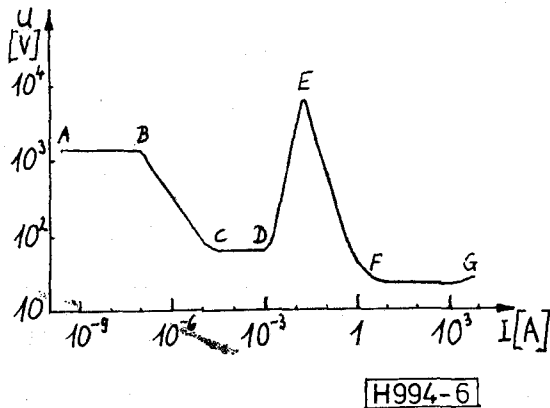
A jelenleg közhasználatú $Nd:YAG$ lézer vetélytársa a $Li-Nd_x-La_{1-x}$ foszfátüveg lézer lehet a jövőben [7]. Hullámhossza $1,054 \mu m$, rezonátorának felépítése az új anyag tulajdonságaiból kiindulva némileg eltér a megszokottól. Hatásfoka kb. 6%, divergenciája 1–2 mrad szemben a $Nd:YAG$ kb. 2%-ával és 10 mrad-jával. Ráadásul jóval olcsóbb és könnyebb is. Kísérleti példányokon túl értékbeállító berendezésbe való beépítésükről eddig még nem tudok.

4. Vágási paraméterek

Az ellenállások értékeinek pontosságát és stabilitását a vágási paraméterek gondos megválasztásával tehetjük a lehető legkedvezőbbé. Az optimum rétegananyagként és értékbeállító berendezésenként különböző (szemben a vágatformákkal), ezért csak technológiai kísérletekkel határozható meg, elméleti megmondásokkal csupán nagyjából határozható be. A változtatható paraméterek a következők:

- lézerteljesítmény
- módusszerkezet
- az impulzussorozat frekvenciája
- vágási sebesség
- a gépen beállítható egyéb jellemzők

Értékbeállító berendezésben a megmunkáló fényfolt átmérőjét fókuszálással rendszerint nem változtatjuk, inkább a lehető legkisebbre állítjuk, hogy a legnagyobb teljesítménysűrűséget kapjuk.



6. ábra. Kripton ívlámpa kisülési görbéje [2]

A-B: gyújtási tartomány
B-E: parázskisülés
E-G: ívkisülés

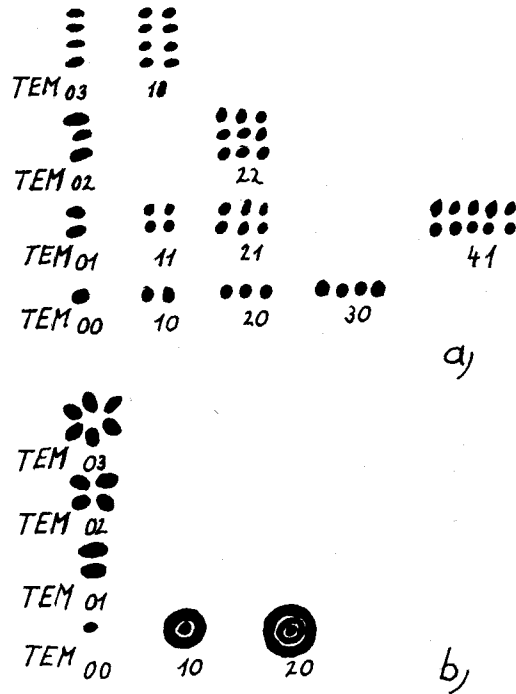
Lézerjelzőteljesítmény

A pumpáló fényforrás kisülési karakterisztikáját a 6. ábra mutatja. A lézerjelzőteljesítményt a lámpaáramnak az F-G tartományban való változtatásával tudjuk befolyásolni. Csak a lámpaáramra hagyatkozni azonban hiba lenne, mivel a lámpa néhány száz üzemórás élettartama alatt folyamatosan öregszik, hatásfoka romlik. Ezért időnként ajánlatos megmérni a tényleges lézerjelzőteljesítményt, és megnézni, hogy mekkora áram szükséges hozzá a lámpa pillanatnyi állapotában.

A gyakorlatban nem elég csak a réteg anyagát elpárologtatni a hordozóról, hanem a hordozó anyagát is el kell távolítani egy bizonyos mélységig. Ugyanis az alapértékgyártás során a réteg anyaga a hordozóba diffundál, és az így létrejövő átmeneti réteg kézben tarthatatlan stabilitású, hőmérséklet- és feszültségfüggésű parazita párhuzamos ellenállásként szerepelne.

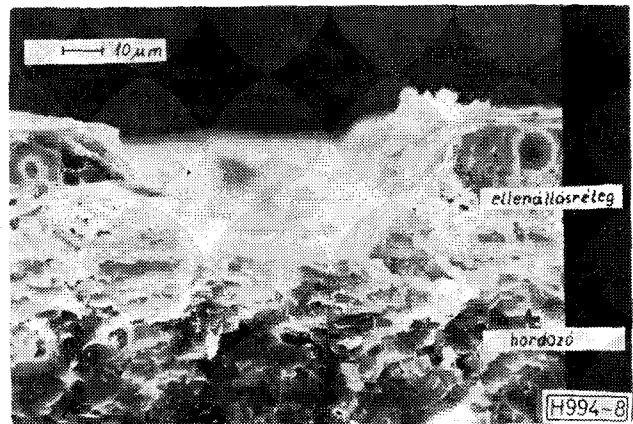
Módusszerkezet

A 7. ábra jellegzetes rezonátor-módusokat szemléltet, ahogyan azok a tükörtől kb. 3 m távolságban elhelyezett ernyőn láthatók. A fényfoltok intenzitás-eloszlása a Bessel-függvényekkel adható meg [3]. Trimelésre a TEM_{00} módus a legkedvezőbb, mert így kapjuk a lehető legmeredekebb intenzitás-eloszlást, azaz a legkeskenyebb megolvasztott, ill. hőkezelt zónát az elgőzölt sáv, vagyis a lézeres vágat két oldalán. A módusválasztásra az 5. ábrán szereplő fényrekesz szolgál. Különböző lyukátmérőjű fényrekeszekkel az alpmóduson belül csak a sugárnyaláb átmérőjét változtathatjuk, miközben az intenzitás-eloszlás jellege változatlan marad [3].



7. ábra. Rezonátor-módusok [1]

a) x-y szimmetriájú, b) r-φ szimmetriájú

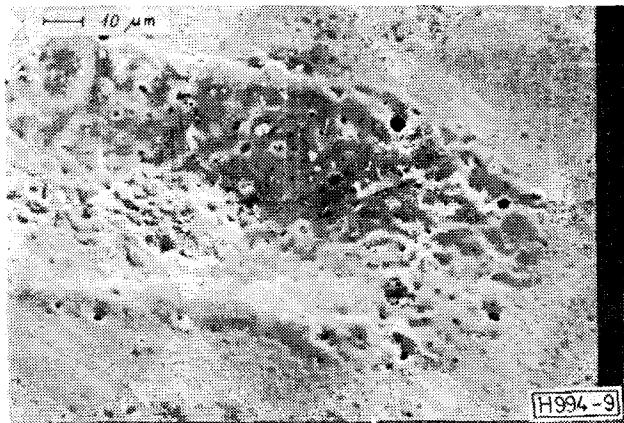


8. ábra. Lézeres vastagréteg vágat keresztmetszetének pásztázó elektronmikroszkópos képe (700-szoros nagyítás)

A 8. ábra egy vastagréteg ellenállásba készített vágat keresztmetszetének pásztázó elektronmikroszkópos felvétele, a 9. pedig egy vastagréteg vágat végéről készült kép, amelyen jól láthatók az ömledék megszilárdulásakor létrejött repedések.

Az impulzussorozat frekvenciája

Az 5. ábrán látható Q-kapcsolóval a rezonátor jóságát változtatjuk. Ez tulajdonképpen egy piezoelektromos kristály, amelyre nagyfrekvenciás (20...30 MHz) jelet bocsátva longitudinális állóhullámokat keltünk. Ezen a sűrűsödésekből és ritkulásokból álló optikai rácson a kristályból jövő infravörös fény szóródik, így nem jöhet létre a lézerfolyamathoz szük-

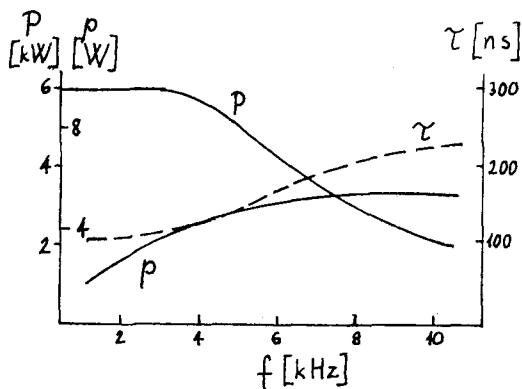


9. ábra. Lézeres vastagréteg vágat végének pásztázó elektronmikroszkópos képe (700-szoros nagyítás)

séges pozitív visszacsatolás. Ha ezt a nagyfrekvenciás jelet egy alacsonyabb alaphfrekvenciájú (0,1...10 kHz) négyzögjel-sorozattal szaggatjuk, a lézer Q -kapcsolt üzemmódban működik. A gerjesztés folytonos, a lézervoyamat impulzusszerű. A Q -kapcsoló „optikai rács” állapotában nagyszámú elektron kerül a Nd pumpált sávjaiba, de csak elenyészően csekély része jut vissza az alapállapotba spontán emisszióval. Létrejön a populáció-inverzió, vagyis az az állapot, amikor a felső szinteken már több elektron van, mint az alsón.

A Q -kapcsoló „átlátszó” állapotában indukált emissziós impulzust kapunk.

Míg folyamatos üzemmódban egy átlagos $Nd:YAG$ lézer kb. 20...100 W maximális teljesítményt szolgáltat, addig Q kapcsolt üzemmódban az impulzusok csúcsteljesítménye kb. 10...50 kW. A csúcsteljesítmény, az átlagteljesítmény és az impulzus félérték-szélesség függését a Q -kapcsoló frekvenciától a 10. ábra szemlélteti.



H994-10

10. ábra. Q -kapcsolt lézer jellemzői a frekvencia függvényében [3]
 f : Q -kapcsoló frekvencia P : csúcsteljesítmény
 τ : impulzusszélesség p : átlagteljesítmény

Vágási sebesség

A 2. részben már említettem, hogy a dR/dx érték-változási meredekség növekedése a leállás pontosságát csökkenti. Ezt a meredekséget a vágat pillanat-

nyi hossza mellett a megmunkáló sugárnyaláb eltérési sebessége határozza meg. A pontatlanság a mérőhíd feléledési idejéből és a leállási parancs végrehajtásának idejéből származik. (A leállás a Q -kapcsoló „optikai rács” állapotban hagyásával és a lézersugár eltérítését végző mozgatható tükör megállításával történik.) Az értékváltozási meredekség növekedésével a vágás ez alatt (a gépre jellemző) idő alatt egyre inkább túlszalad, a kapott végértékek átlaga növekszik.

Ez még nem lenne baj, de mivel nem folyamatos, hanem Q -kapcsolt üzemmódban dolgozunk (a vágat az impulzusok által a rétegből kiobbantott kráterek egymást átfedő láncolataként jön létre) a vágási sebesség növelésével a végértékek halmazának szórása is megnő.

A vágási sebességet nemcsak a kívánt pontosság korlátozza. Ha túl gyorsan vágunk, a kráterek átfedése túlzottan lecsökken, esetleg megszűnik. Ha ezt az átfedést a Q -kapcsoló frekvencia növelésével próbáljuk helyreállítani, egyre alacsonyabb csúcsteljesítményt kapunk. A tiszta vágatfenék érdekében tehát lámpaáramot kell növelnünk, ami viszont lecsökkenti a mérlegdrága lámpa élettartamát: a termelékenység csekély növeléséért irreálisan magas árat fizetnénk.

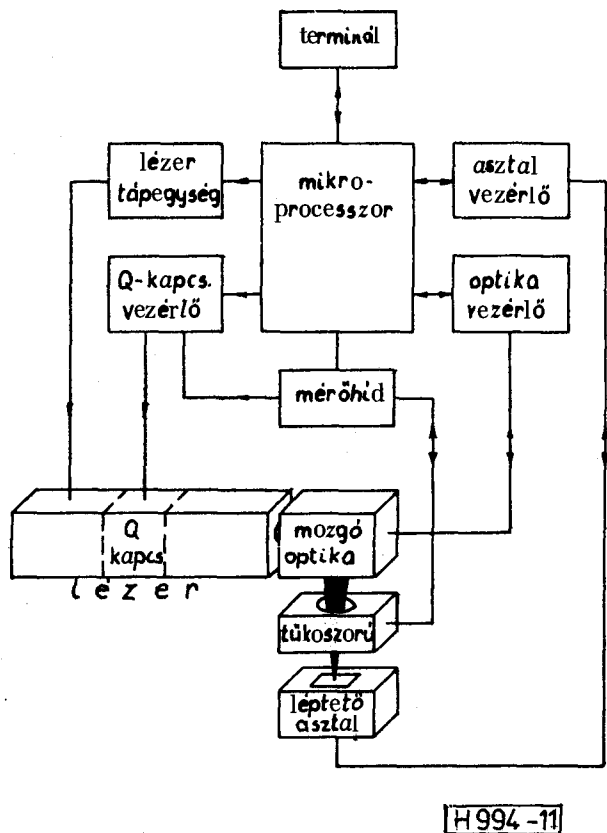
A gépen beállítható egyéb jellemzők

Az értékbeállító berendezésen megválaszthatjuk a lámpaáramot, fényrekesz-átmérőt, Q -kapcsoló frekvenciát és vágási sebességet. Korszerű gépeken megadható egy kezdeti és egy csökkentett vágási sebesség is, az átváltás pillanatának (a névérték százalékában való) előírásával. Lassításkor a Q -kapcsoló frekvencia is arányosan csökken úgy, hogy a kráterek átfedése ne változzon.

A gépek legtöbbje értékbeállítás előtt és után egyaránt végez mérést. Mindkettőhöz megadható egy-egy tűrésmező. Előméréskor (a már eleve túl magas értékű példányok mellett) a nagyon alacsony értékű ellenállásokat kell selejtnek tekinteni, mivel sok vágással nagyon elszűkítve a vezető csatornát úgysem kapnánk stabil értékű ellenállást. A végmérés tűrésmezőjénél a tényleges végtűrésen kívül a várható értékváltozást is figyelembe kell venni. Az értékváltozás időben lassuló, aszimptotikus. Vékonyrétegek értéke bármerre változhat, vastagrétegekre a növekedés jellemző.

Ha a névleges értéknél próbálnánk meg abba hagyni a vágást, a végértékek átlaga eltérne a névlegestől. Ezt egyrészt a gép által okozott (az előző pontban leírt) túllövés, másrészt a réteg viselkedése okozza: vágás közben meleg értéket mérünk, az anyagban pedig kémiai és szerkezeti változások zajlanak le. A gép és a réteg által okozott eredő eltérés vékonyrétegeknél bármilyen lehet, vastagrétegekre a túllövés jellemző. Az átlagos eltérés „előtartás”-ként megadható a gépnek (a névérték százalékában), hogy ezen érték elérésekor adjon leállási parancsot. Az előtartást a várható értékváltozás előzetes kiegyenlítésére is használjuk.

Kettős vagy L -alakú vágásoknál megadhatjuk, hogy a gép a névérték hány százalékánál kezdje a második vágást, ill. forduljon be. Egyes gépeken a



11. ábra. CNC értékbeállító tömbvázlata [6]

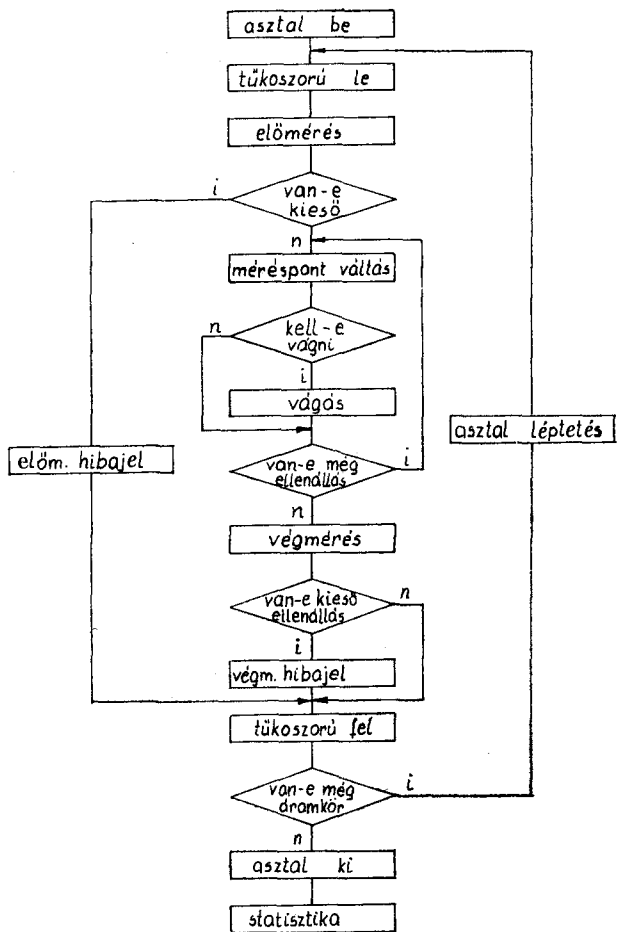
két vágás, ill. az *L*-betű két szára hosszának arányát is megválaszthatjuk, ilyenkor a mért alapértékből kiszámolja az ehhez szükséges fordulási értéket.

5. Értékbeállító berendezés

A 11. ábra egy korszerű CNC értékbeállító berendezés (Laser Optronics 685, NSZK) vázlatja. Az elektronika Z80 mikroprocesszorra épül. A hozzá csatlakozó terminálon írható, javítható az értékbeállító programok, amelyeket hajlítható magneselemek tárolunk. Minden áramkörhöz a programján kívül egy mérőtű-koszorú is tartozik, amelyről 40 pontra lehet kontaktálni, duplán is, ha Kelvin-mérésre van szükség. Egy áramkörön belül a mozgatható tűkrök térítik el a lézersugarat, egy hordozó több áramkört pedig az *X-Y* asztal lépteti egymás után a tűkoszorú alá. Az értékbeállítás menetét a 12. ábra mutatja be.

Érdemes megemlíteni azt a hasznos mérési statisztikát, amelyet ez a gép szolgáltat. Táblázatban felsorolja az áramkör ellenállásainak pozíciószámát és névértékét, valamint az előmérés és végmérés eredményét. Mindkét mérésről átlagértéket és szórást közöl (a névérték százalékában), a trimmelt darabszám feltüntetésével. A sornyomatóval kiíratott táblázatokat megőrizve pontos képet kapunk az alapértékgyártásról és az értékbeállításról egyaránt.

A berendezést IEC csatlakozó vezérelve HP-85 kisszámítógépen írt és futtatott programokkal, IEC csatlakozási lehetőséggel rendelkező műszerek, generátorok stb. segítségével ún. „aktív” értékbeállítást



12. ábra. A trimmelés folyamatábrája

is végezhetünk. Ilyenkor a szokványos („passzív”) trimmelés során az áramkör valamely fontos jellemzőjét meghatározó ellenállást nem állítjuk be. Az áramkörbe beültetjük a hibrid alkatrészeket, a tokozástól eltekintve készre szereljük. Ezután tápfeszültség rákapcsolásával, működés közben trimméljük az előzőleg kihagyott ellenállást a kívánt paraméter eléréséig.

Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti dr. Molnár Pétert segítségéért, amelyet a kézirat gondos átnézésével és hasznos megjegyzéseivel nyújtott.

IRODALOM

- [1] K. Tradowsky: A laser abc-je (Műszaki, 1971).
- [2] John E. Harry: Ipari lézerek és alkalmazásuk (Műszaki, 1979).
- [3] Molnár Péter: Lézeres anyagmegmunkálás az elektronikai iparban (egyetemi doktori értekezés, 1979).
- [4] Laser Trimming for Thick Film Resistors (Du Pont Electronics, 1976).
- [5] E. Wehrhahn: A Fast Iterative Algorithm for the Evaluation of Trimmed Resistor Characteristics (4th European Hybrid Microelectronics Conference, 1983/388–396. oldal).
- [6] Laser Optronics 685 gépkönyve.
- [7] Czigány I., Kertész I.: Neodímium-lézer fejlesztése (MTA/KFKI Evkönyv, 1981–82/46–50. oldal).