

ADALÉKOK A TRANZISZTOR ELŐTÖRTÉNETÉHEZ

Rékai János
ny. villamosmérnök

Az elmúlt évszázad húszas éveiben – amikor még fénykorukat élték a kristálydetektoros rádiók – kezdett kibontakozni egy olyan kutatási irányvonal, amely a mintegy húsz-harminc évvel később létrejövő félvezető eszközök előmunkálataival foglalkozott. A teljesség elvárása nélkül, de az emlékezet fenntartása igényével jelen sorok célja felidézni néhány olyan kutatót, akik úttörő munkáik ellenére a feledés homályában maradtak.

O. V. Losev

Oleg V. Losev (1903–1942) (1. ábra) az Orosz Birodalom egy magas rangú családjából származott. Tanulmányait követően a Nyizsnij Novgorod-i Rádió Laboratóriumban dolgozott és számos publikációt jelentetett meg. A vezeték nélküli műsorszórás hajnalán különböző kísérleteket folytatott kristályokkal a rádióvétel tökéletesítése céljából. Noha elsősorban a megbízható demodulálást szerette volna elérni, mégis meglepő eredményre jutott az acélelektrodás cinkit (cink-oxid) kristály alkalmazása során, amellyel erősítést ért el, és így valószínűleg első ízben valósult meg egy aktív szilárdtesteszköz. A felvett karakterisztika nyilvánvaló magya-

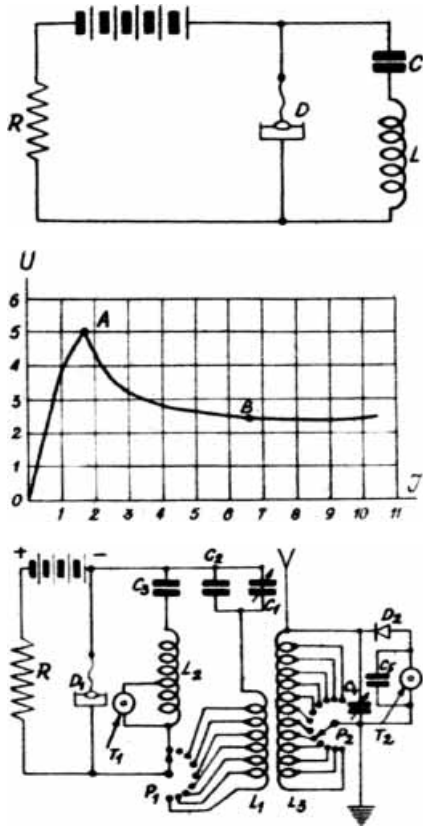


1. ábra. Oleg Losev

rázattal szolgált, amelyen jól definiálható negatív ellenállású szakasz látható (jellege az évtizedekkel később megalkotott tunel-diódára emlékeztet). A detektort alkalmazta szuperregeneratív és heterodin rendszerű rádiókészülékekben, de készített egyszerű elektroncső nélküli visszacsatolós vevőt is, amelyet *krisztadin*nak nevezett (2. ábra). Mivel felső sávhatára körülbelül 5 Mhz-ig terjedt, működött

oszillátorként adóegységben is [1, 2]. Ez a tapasztalati úton létrejött eszköz azonban nem kapott megfelelő támogatást, és elméleti háttér, valamint az ipari infrastruktúra hiányában hamar feledésbe ment. Losev is elhagyatva és megbecsülés híján, életének harminckilencedik évében a körülzárt Leningrád embertelen körülményei között halt meg.

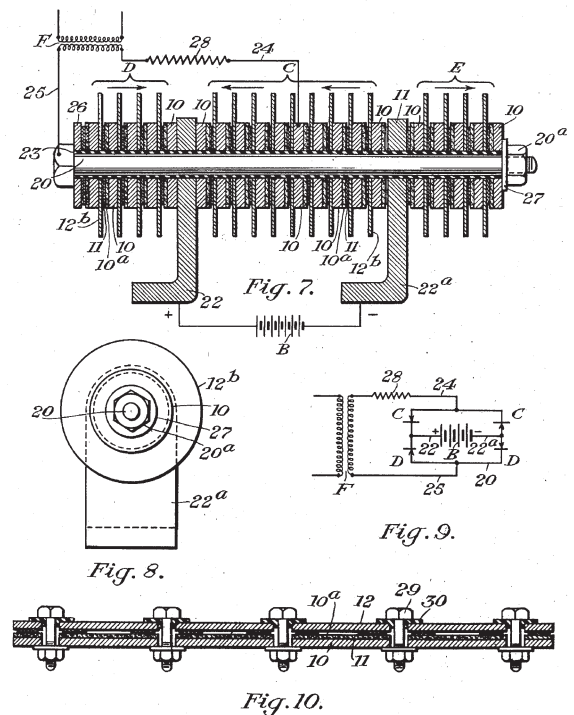
A jelenkor kutatásai fényt derítettek a fényemissziós dióda felfedezésére vonatkozó úttörő munkájára is.



2. ábra. Fent: Losev első kísérletének kapcsolási rajza, középen: gerjesztő detektor karakterisztikája, alul: a kristalddal felépített rádióvevő.

Kísérletei azon a *H. J. Round* által 1907-ben észlelt jelenségen alapultak, amely szerint a szilíciumkarbid (SiC) kristály két pontja közé kapcsolt feszültség sárgás színű fénykibocsátást eredményez. 1927-ben Moszkvában szabadalmaztatta (n° 12191) a fényrelé elnevezésű találmányát (3. ábra); élete során számtalan tanulmánya jelent meg erről az általa készített eszközről, amely az elektrolumineszcencia elve alapján működött. Ilyen irányú tudományos tevékenysége azonban nem talált visszhangra egészen 1951-ig, amikor is *Kurt Lehovec* megjelentette cikkét a *Physical Review* augusztusi számában, (*Injected light emission of silicon carbide crystals*).

3. ábra. Losev fényrelé szabadalma (balra), ő ismerte fel először a LED telekommunikációs felhasználásának lehetőségét. Szilíciumkarbid (SiC) detektorkristály áramerősség–feszültség karakterisztikája (jobbra) az 1928-as *Philosophical Magazine*-beli cikkéből, a fénykibocsátás kezdőpontja jelölve.



4. ábra. Részlet L. O. Grondahl 1,640,335 számú egyenirányító szabadalmából.

L. O. Grondahl és P. H. Geiger

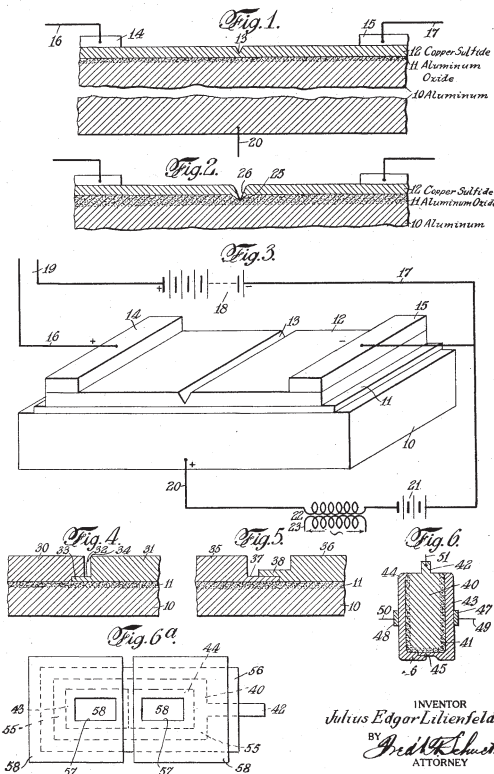
Lars Olai Grondahl és *Paul H. Geiger* 1927-ben szabadalmaztatták a réz-oxid egyenirányítót és ezzel szakítottak azzal a korábban kialakult gyakorlattal, amely szerint felhasználási területtől függően csak kristály- vagy vákuum-egyenirányítót alkalmaztak, (US Patent 1,640,335, *Unidirectional current carrying device*, 4. ábra) [9, 10]. A választék a harmincas évek elején az 1883-ban *C. E. Fritts* révén ismertté vált szelén egyenirányítóval bővült [5].

J. E. Lilienfeld

Julius Edgar Lilienfeld (1881–1963), aki Lembergben (mai nevén Lvov) született az Osztrák–Magyar Monarchia területén, a kor természettudományos polihistora volt (5. ábra). Berlieni egyetemi tanulmányai ugyanis a gépészetén kívül a filozófia, a matematika, a fizika és a kémia területére is kiterjedtek. Az első világháború után a Németországban megerősödő antiszemitizmus miatt 1926-ban lemondott a lipcsei egyetemen betöltött állásáról és az Egyesült Államokban telepedett le, ahova 1921-től röntgensóvel kapcsolatos szabadalmi és előadásai révén



5. ábra. J. E. Lilienfeld



6. ábra. Lilientfeld 1,900,018 számú szabadalmának részlete, a benne leírt struktúra egy kiürítéses MOSFET-nek felel meg.

gyakran utazott. Kezdetben a New York-i Egyetemen dolgozott, majd 1928-tól az Amrad rádió és alkatrészgyártó cégnél az elektrolitkondenzátor-gyártás korszerűsítésében jelentős szabadalmakat alkotott. 1928-ban benyújtott szabadalma (US Patent 1,906,691) [9] olyan meghatározó elméleti és gyakorlati mű, amely a mai napig alapjaiban van jelen az elektrolitkondenzátorok gyártásában. Ezen túlmenően, a benne megfogalmazott ideák vezethették őt el egy tervezérlésű aktív eszköz leírásához. Miközben új munkahelyén, az Ergon Magnavox kutatási laboratóriumában kötelességszerűen fizikai kémiával foglalkozott, figyelme egyre inkább egy szilárdtest-egyenirányító létrehozására összpontosult. Elvetve a vákuumsövekben alkalmazott klasszikus termoionizációs emisszió elvét, a vezetőképesség modulációját kívánta megvalósítani keresztirányú elektromos tér segítségével. 1926 és 1928 között benyújtott három szabadalma közül az első (US Patent 1,745,175, *Method and Apparatus for Controlling Electric Currents*) egy háromelektrodás rézszulfid-struktúrát javasolt, amelyet az utókor egy tervezérlésű aktív eszköz (FET) elméleti leírásának ismer el. A második (US Patent 1,900,018, *Device for controlling electric current*, 6. ábra) [9] eltér az előzőekben alkalmazott kivitelől és a jelenből visszapillantva egy kiürítéses struktúrájú MOSFET leírását tartalmazza.

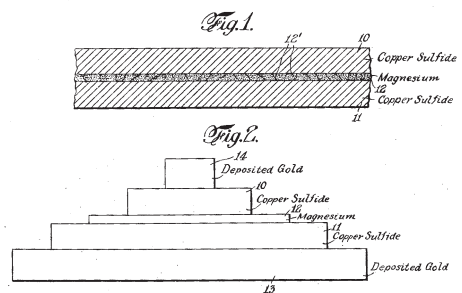
Lilientfeld elgondolásában egy téglalap alakú alumínium hordozó rétegre felvitt oxidréteg felületén levő rézszulfid réteg két szélső elhelyezkedésű elektróda-

felületet hord, amelyek a tápforrásra csatlakoznak. A rézszulfidréteg a geometriai középvonalban – az elektródákkal párhuzamosan – egy bevágás által elvékonyodik. Az alumínium hordozó réteg egy előfeszítő telep révén pozitív feszültséget kap, amely áramkör egy sorosan bekötött transzformátor segítségével vezérelhető.

A harmadik szabadalom (US Patent 1,877,140, *Amplifier for electric currents*, 7. ábra) [9] alapvetően az MBT (Metal Base Transistor) vagy az SMST (Semiconductor Metal Semiconductor Transistor), illetve egy SBCT (Schottky-barrier-collector Transistor) tranzisztorstruktúra leírása.

Nem ismeretes, hogy Lilientfeld valaha is megvalósította volna az elméleteiben leírt eszközöket. Amennyiben igen, úgy valószínűsíthető, hogy azok nem működtek megfelelően, mivel a magas színvonalú félvezető anyagok gyártástechnológiájának létrejöttét még évtizedek választották el korától. Viszont inspiráló hatása igen jelentős volt és nagymértékben befolyást gyakorolt a következő évtized kutatási irányaira. A Bell Laboratóriumban *William Shockley* a 30-as évek második felében réz-oxid egyenirányítókkal folytatott kísérleteket, jelen terminológia szerint egy Schottky-kapus tervezérlésű aktív eszköz létrehozása céljából. Azonban az eredmények lényegesen elmaradtak az elméletben elvárt hatástól. (1972-ben Shockley még egyszer megkísérelt réz-oxid alapú erősítőt készíteni az 1939–40-es elképzelései alapján, de az sem hozott kielégítő eredményt [11].) Lilientfeld szabadalmi bejelentései (tizenöt német és hatvan Egyesült Államok-beli) közül az előzőekben említett három rendszerint szerepel az 1948-tól bejegyzett tranzisztor-találmányok hivatkozási listáin, és ilyen módon munkássága nem maradt elismerés nélkül. Mindamelllett élete végéig küzdött azért, hogy elismerjék részvételét a múlt század ezen legjelentősebb elektronikai találmányát illetően. Annak ellenére, hogy nem a megfelelő korban fejthette ki tevékenységét (jelentős szerepe az elektrolit kondenzátor gyártástechnológiájában alig ismert), megérdemli az elismerést mint tudós és termékeny feltaláló. Ezt juttatta kifejezésre az Amerikai Fizikai Társaság 1988-ban, amikor Lilientfeld-díjat alapított.

7. ábra. Részlet Lilientfeld 1,877,140 számú szabadalmából, mely különböző tranzisztorstruktúrák alapvető leírását tartalmazza.





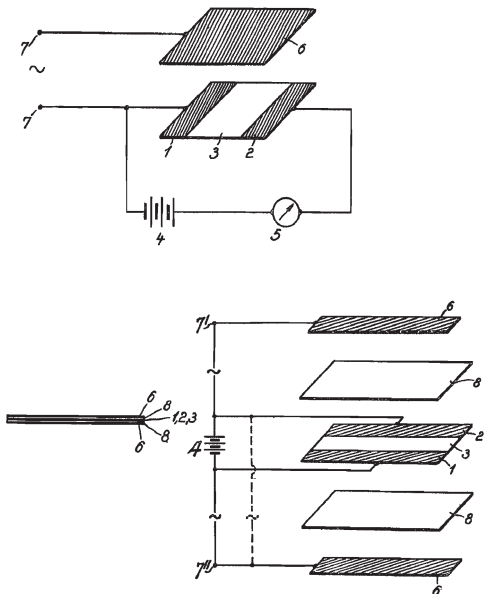
8. ábra. Oskar Heil és felesége, Agnesa Arsenjeva 1935-ben.

O. Heil

Oskar Heil (1908–1994) a Rajna-vidéki Langwiedben született. Fizikai, kémiai, matematikai és zenei tanulmányokat folytatott a Göttingeni Egyetemen. 1933-ban doktorált a molekuláris spektroszkópia témakörében. 1934-ben, Leningrádban (ma Szentpétervár) feleségül vette az 1928-ban, szintén Göttingenben fizikai doktorátust szerzett Agnesa Arsenjevát (8. ábra). Ugyanabban az évben Cambridge-ben Lord Rutherford mellett dolgoztak a Cavendish Laboratóriumban. Feleségével 1935-ben írt tanulmányuk a klisztron alapelvéről ma is elismert értekezés. A háború befejezéséig Németországban mikrohullámú csövek fejlesztésén dolgozott; utóbb az Egyesült Államokban telepedett le. Az 1970-es években *Air motion transformer* néven bejegyzett hangszóró-találománya (9. ábra) mai napig jelen van a közép- és magas-hang-sugárzók membránkialakításában.

1935-ös angol szabadalmi leírása egy félvezető alapú térvezérlésű eszköz ismertetése (GB Patent 439,457,

10. ábra. Részlet Oskar Heil 439,457 számú szabadalmából, az egyes jelölések jelentését lásd a szövegben.



United States Patent

Heil

[15] 3,636,278

[45] Jan. 18, 1972

[54] ACOUSTIC TRANSDUCER WITH A DIAPHRAGM FORMING A PLURALITY OF ADJACENT NARROW AIR SPACES OPEN ONLY AT ONE SIDE WITH THE OPEN SIDES ALTERNATINGLY FACING IN OPPOSITE DIRECTIONS

[72] Inventor: Oskar Heil, San Mateo, Calif.
 [73] Assignee: Heil Scientific Laboratories, Inc., Belmont, Calif.
 [22] Filed: Feb. 19, 1969
 [21] Appl. No.: 800,579

[52] U.S. Cl. 179/115.5PV
 [51] Int. Cl. H04R 9/02
 [58] Field of Search..... 179/114, 115, 115.5, 115.5 PV, 179/115.5 VT, 111, 138, 138 VL, 181/32

[56] References Cited

UNITED STATES PATENTS
 2,975,307 3/1961 Schroeder et al. 179/111 X
 2,855,467 10/1958 Curry. 179/111
 1,934,184 11/1933 Gerlach et al. 179/115.5 PV
 1,849,840 3/1932 Kellogg. 189/27

FOREIGN PATENTS OR APPLICATIONS

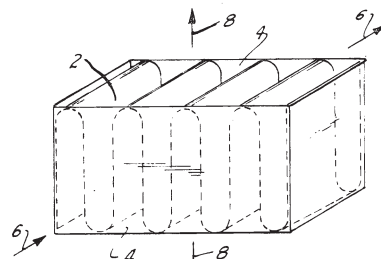
460,775 2/1937 Great Britain 179/138 V
 939,508 11/1948 France 179/115.5 V

Primary Examiner—Kathleen H. Claffy
 Assistant Examiner—Thomas W. Brown
 Attorney—Michael S. Striker

[57] ABSTRACT

An acoustic transducer with a new kind of diaphragm geometry and a new kind of acoustical or vibratory excitation of the diaphragm. The diaphragm comprises a plurality of substantially equal spaced and substantially parallel diaphragm portions which define between themselves small air spaces, and means connecting the diaphragm portions to each other in such a manner so as to close each of the air spaces at three sides while the fourth side is left open and with the open sides of adjacent air spaces respectively facing in opposite directions. As a result of this arrangement, the narrow air spaces between adjacent diaphragm portions get alternately enlarged or reduced and alternately air is sucked in or expelled from the adjacent air spaces during vibration of the diaphragm portions. During each half-cycle of the vibration air is sucked in one direction into every second of the adjacent air spaces and expelled in the opposite direction from the other air spaces and during the next half-cycle the motion of air into and out of adjacent air spaces is reversed. Such a vibratory diaphragm arrangement moves more air with less kinetic energy than conventional diaphragms. The vibratory diaphragm portions may be directly driven by applying an audio current, respectively an audio voltage to conductors attached to the diaphragm portions and located in a strong magnetic field, or the diaphragm portions may be indirectly driven by a pair of voice coils alternately attached to adjacent vibratory diaphragm portions to move the latter toward and away from each other. On the other hand, the vibratory diaphragm portions may be acoustically driven and audio currents, respectively audio voltages, may be produced in conductors attached to the diaphragm portions and moving in a strong magnetic field.

34 Claims, 21 Drawing Figures



9. ábra. Oskar Heil „holografikus” hangszóró-találománya.

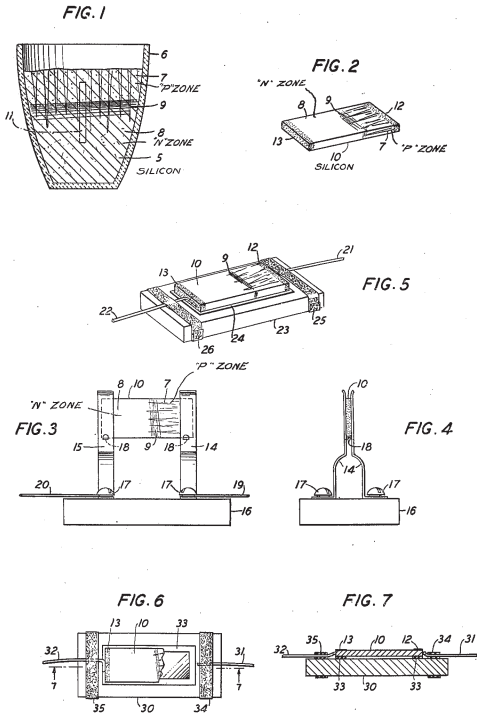
Improvements in or Relating to Electrical Amplifiers and other Control Arrangements and Devices, 10. ábra [9]. Az 1 és 2 fémlektrodák között egy vékony félvezető réteg helyezkedik el (3), melyet vertikálisan, (egy-egy szigetelő lapka közbeiktatásával) (8) – mint egy kondenzátor-fegyverzet – két elektróda zár be (6). A réteg ellenállását ezen két utóbbi (vezérlő) elektródára kapcsolt feszültség által keltett elektromos tér befolyásolja. Így az elektroncsőhöz hasonlóan, terhelés nélküli kis jelű vezérléssel jelentős áramváltozásokat (és erősítést) kívánt elérni a félvezető réteg geometriai méreteinek alkalmas megválasztásával. A leírásban javasolt anyag valamilyen fém-oxid: réz-oxid, vanádium-pentoxid [8].

R. Ohl

Russell Ohl (1898–1987) amerikai mérnök (11. ábra) – akinek az első korszerű napelem-szabadalom (12. ábra) tulajdonítható (US Patent 2,402,662, *Light sensitive device*) [9] – már jóval a tranzistor feltalálása előtt elkötelezte magát a félvezető-kutatáshoz. Kezdetben bizonyos kristályfajták viselkedését tanulmányozta, majd a harmincas évek során nagyfrekvenciás



11. ábra. Russell Ohl (balra) és Jack Scaff.



12. ábra. Russell Ohl napelem-szabadalma.

rádió-műsorvétel, illetve radar területén alkalmazható egyenirányító diódák kifejlesztésével foglalkozott a Bell Laboratóriumban. Az évtized vége felé ott kezdett kibontakozni egy kis létszámú, de kiváló felkészültségű, lelkes kutatógárda, amelyben Russell Ohlra különösen *Walter Brattain* inspiráló hatása volt jelentős. 1939-ben még nem tárták fel megfelelő alapossággal a kristályszennyeződések természetét, de munkája során Ohlnak feltűnt, hogy bizonyos idegen anyagok jelenléte a félvezetőkben nagymértékben befolyásolják azok elektromos ellenállását. Megállapította, hogy a további kutatások alapfeltétele a „szuper tisztaságú” germánium (vagy szilícium) létrehozása, mivel csak ez biztosíthatja az elérni kívánt diódarkarakterisztikát, illetve az alkalmazáshoz elengedhetetlen reprodukálhatóságot. (A minden tekintetben minőségi szilíciumtisztítást a Du Pont Chemical Company keretein belül a Pennsylvaniai Egyetem kutatócsoportja végezte *Frederick Seitz* irányításával, az amerikai radarfejlesztő MIT Radiation Laboratory védnöksége alatt.) A megfelelő alapanyag birtokában az anyagszerkezetben igen jártas *Jack Scaff* és a vegyész *Henry Theurer* révén elérték, hogy a megfelelően alkalmazott szennyező elemek bevitelével létrejöjjön a szabad elektronokban, illetve a pozitív töltéshordozókban gazdag *n*, illetve *p* réteg. Ehhez az ötödik főcsoportból a foszfort, illetve a harmadikból a bórt használták fel. Ezek után kézenfekvő volt, hogy a kutatást a két félvezető lapka összeillesztésével tovább folytatták, és így megvizsgálhatták a határterületen lejátszódó eseményeket [7].



13. ábra. Karl Lark-Horovitz és a mögötte álló Seymour Benzer.

Félvezető-kutatás a Purdue Egyetemen

A második világháború alatt, illetve az azt megelőző években az egyetem szakember és felszerelés tekintetében is alkalmas volt arra, hogy a háború két legnagyobb szabású programjában részt vállaljon. Az egyetemen rövid idő alatt munkába állított ciklotron révén bekapcsolódtak a Manhattan Tervbe, míg a radarkutatás területén a *Karl Lark-Horovitz* (1892–1958) által vezetett kutatócsoport – kihasználva a félvezetőkben rejlő előnyöket – egy alkalmasabb kristály-egyenirányító létrehozásába kezdett. A korábban használt eszközök ugyanis (kristálydetektor, réz-oxidul és szelén-egyenirányító, vákuumdióda) alkalmatlannak bizonyultak a mikrohullámú felhasználásra, részben a működési bizonytalanság, részben pedig a magasabb frekvenciákon megengedhetetlenül nagy kapacitásértékek miatt.

Angliában már sikerrel alkalmazták a szilíciumot az úgynevezett red dot egyenirányítók esetében, amikor 1942 márciusában a fém-kristály kontaktus kísérleteivel kezdődtek a kutatások. Ennek keretében tökéletesítették a század elején megalkotott „cat whisker” (macskabajusz) elnevezésű szerkezetet, amelynek révén biztonságosan lehetett érintkezni a kristállyal. Gyors eredményre azonban nem számíthattak, mivel az alacsony tisztaságú kristály érzékenységszökkenést és jelentős működési bizonytalanságot eredményezett; ugyanakkor gyakoriak voltak a kiegészékek is az áramkörre való kapcsolás során. Az idő sürgetése ellenére a kutatócsoport kénytelen volt alapkutatásba fogni az anyag tulajdonságait illetően, és arra a következtetésre jutott, hogy a szilícium és a galenit kristály

14. ábra. Második világháborús egyenirányító dióda a nagyfrekvenciás radarokhoz.



(PbS) helyett germániumot alkalmaz alapanyagként. Ez esetben ugyanis a tisztítási eljárás könnyebbnek bizonyult és jobban ellenőrizhető a szennyező anyagok jelenlétét is. Ebben nagy segítségükre volt az Eagle Picher cég, amely 1941-ben létrehozta az első germániumszeparátor és -tisztító gyáregységét. Korábban a germániumot, mint az őnfeldolgozás jelentéktelen melléktermékét nem hasznosították. Az egyetemi kutatócsoport kidolgozta a kellő mértékben tiszta alapanyag kristálynövesztési eljárását, majd meghatározta az n és p típusú szennyezés körülményeit. Számptalan fizikai, kémiai és technológiai probléma megoldása után a *Seymour Benzer* (aki a későbbiekben a molekuláris biológia és a viselkedéstan irányába orientálódott) által vezetett munkacsoport jóvoltából megszületett egy 100 V-os zárófeszültségű félvezető dióda. A továbbiakban rendszerint ők látták el – a további kutatásokhoz nélkülözhetetlen – nagy tisztaságú germániummal a Bell Laboratóriumot. A háború diktálta feszített tempó, illetve a hadsereg illetékei által szervezett együttműködő laboratóriumok és gyártó egységek részvétele sokakat „birtokon belüli” helyzetbe juttatott az új termékek/eljárások terén, és később sem igen adott lehetőséget a jogi védettség tisztázására. A Purdue Egyetem kiváló szakemberei közül csak néhányan publikáltak doktori szintű értekezéseket, és azok is csak egy szűk réteg által váltak értékelhetőkké. (Termékeik és laboratóriumi szintű gyártási eljárásaik, amelyek eredetileg az állami finanszírozás ellenére is az egyetemi kutatócsoport szellemi produktumainak tekinthetők, nem olyan értelemben váltak közkinccsé, ahogyan az azokat létrehozók elképzelték, hanem elsősorban a Bell Laboratóriumon belüli magasan kvalifikált, vállalkozó szellemű tudósok szellemi és anyagi javait gazdagították [6].)

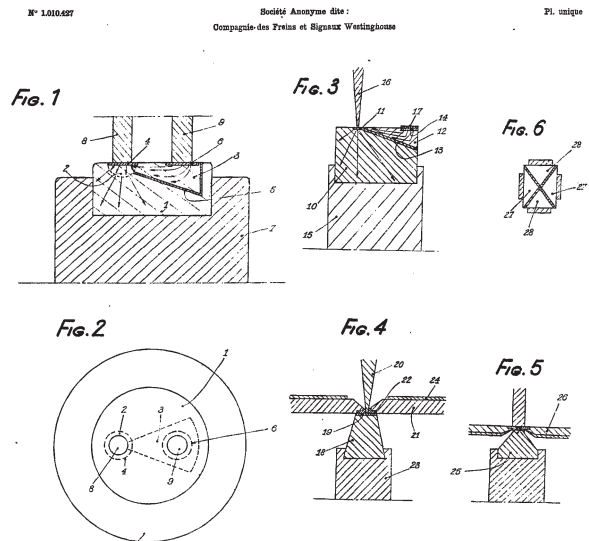
H. J. Welker

Heinrich Johann Welker (1912–1981) a németországi Ingolstadtban született, felsőfokú tanulmányait a müncheni egyetemen végezte. Elméleti fizikusként doktori disszertációját a hullámmechanika tárgykörében írta. A háborús évek során – miközben fenntartotta kapcsolatát a müncheni egyetemmel – az Oberpfaffenhofenben működő, a vezeték nélküli távközléssel foglalkozó Luftfunkforschungs Institutban dolgozott (15. ábra).



15. ábra. Heinrich J. Welker

A háború után a Westinghouse párizsi leányvállalatához került. 1948. augusztus 13-án német fizikus kollégájával – *Herbert F. Mataréval* – találmányi bejelentést tett, amelynek tárgya a Bell Laboratórium által néhány héttel korábban nyilvánosságra hozott tús tranzistorral analóg aktív eszköz (FR Patent 1,010,427,



16. ábra. Részlet a francia tranzistor szabadalmi bejelentéséből.

Nouveau système cristallin à plusieurs électrodes réalisant des effets de relais électroniques, illetve US Patent 2,673,948 *Crystal device for controlling electric currents by means of a solid semiconductor*, 16. ábra) [9]. A következő évben, május 18-án a nyilvánosságának is bemutatták a *Transistron* néven bejegyzett „francia tranzistor”-t, amely kettejük egymástól függetlenül elért kutatási eredményeinek terméke.

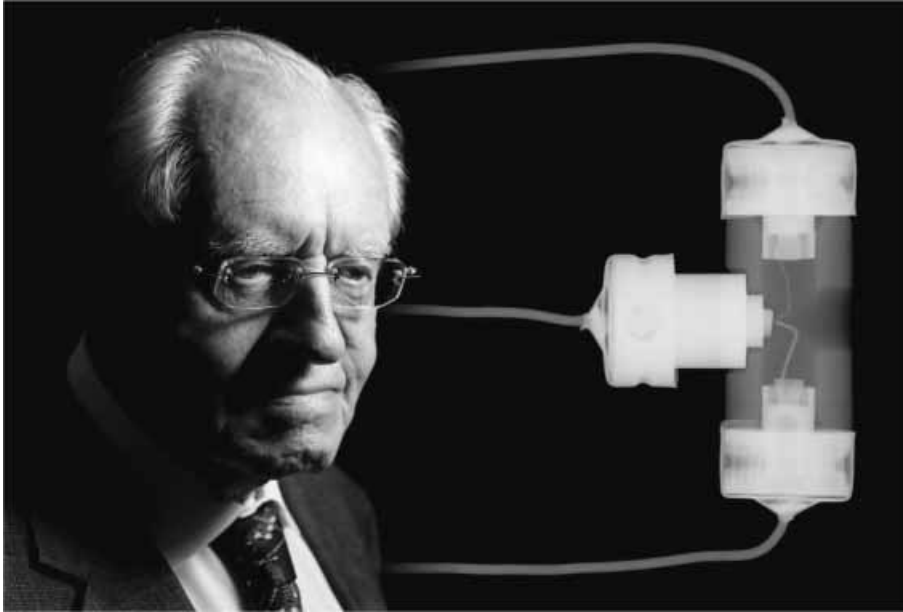
1951-től az erlangeni Siemens-Schuckertwerke Szilárdtest-Fizikai Főosztályát, majd igazgatóként a tröszt kutatási laboratóriumát vezette. Tevékenységi köre az optoelektronikától a lézerdiodákon át a mikrohullámú félvezetőig terjedt.

1977-től haláláig volt a Német Fizikai Társaság elnöke. Emlékét ma egy díj örökíti meg.

H. F. Mataré

Herbert Franz Mataré (1912–) alkalmazott fizika szakon diplomázott az Aacheni Műszaki Egyetemen, majd matematikai, fizikai és kémiai tanulmányokat folytatott a Genfi Műszaki Egyetemen. 1939-től a Telefunken berlini kutató laboratóriumában először a vákuumcsövek miniatürizálásával foglalkozott, majd a szilárdtestfizika legújabb eredményeit feldolgozva keresett alternatív megoldásokat J. E. Lilienfeld, W. Schottky, O. Heil és R. W. Pohl munkássága alapján. 1943-tól a szövetséges bombatámadások miatt a laboratórium Sziléziába költözött, ahol Mataré az SHF-vevők érzékenységének javítására összpontosította figyelmét. 1944-ben, a szovjet csapatok közeledtével, Thüringiában folytatták a munkát.

A háború befejezését követően először az aacheni egyetemen és Wabernben tartott fizikai és matematikai kurzusokat, majd meghívást kapott a francia fővárosban levő Compagnie des Freins & Signaux Westinghouse cégtől félvezető dióda gyártásának megszervezésére. Így került sor H. J. Welkerrel való együttműködése keretében a már említett „francia tranzistor” kifejlesztésére (17. ábra).



17. ábra. Herbert Franz Mataré a 2000-es évek elején és a transztron röntgenképe. Forrás: M. Riordan: How Europe Missed the Transistor [3].

Hazatérése után, 1952-ben Düsseldorfban *Jakob Michaellel* megalapította az Intermetall nevű céget, amely a Párizsban elsajátított tapasztalatok és technológiák alapján germánium-diódákat és -tranzisztorokat gyártott. Az 1953-as düsseldorfi rádió-kiállítás keretében mutatta be azt az egyedi kivitelezésű (doboz nélküli) fülhallgató rádiót (18. ábra), amely négy saját gyártmányú tús transztront tartalmazott. A kutatást abbahagyva, a továbbiakban gyártási eljárásokkal foglalkozott mindaddig, amíg az Intermetall be nem olvadt a Clevite Corp. (Cleveland – Ohio) elektronikai vállalatba, amely a későbbiekben a Shockley Transistor Corp. tulajdona lett.

18. ábra. Az 1953-as düsseldorfi rádió-kiállításon bemutatott négy tús transztront tartalmazó rádió.



Mataré ezt követően az Egyesült Államokban telepedett le, ahol továbbra is hűséggel szolgálta a félvezető-kutatás és gyártás ügyét.

Welker és Mataré közös találmánya a maga ismeretlenségében is rejtélyes és további magyarázatra szorul. *Michel Riordan*, a kaliforniai Stanford Egyetem fizikatórténeti kutatójának írása nyomán kibontakozik egy megismérlésre méltó történet:

Miközben mindketten hasonló szintű tudományos fokozatot értek el, Mataré elfoglalta állását a berlini Telefunken cég radarlaboratóriumában. Feladata a vevő keverőegységének zavarjel-elynomása volt, e fokozat volt hívatva a célról visszajövő nagyfrekvenciás jel alacsonyabb frekvenciára való konvertálására, amelyet a további fokozatok már képesek voltak kezelni. (Ezidőtájt a német radarok az 50 cm-es hullámhossztartományban működtek; ez a légierők esetében határt szabott a felismerhető legkisebb tárgyakra.) Tekintettel arra, hogy a vákuumdióda anód-katód kapacitása a technológia tökéletesítésének során elérte a minimum értéket, Mataré figyelme gyermekkori amatőrkedésének tárgyára összpontosult: a kristálydetektorra. A Siemens AG-nál dolgozó Walter Schottky elméleti munkái dacára még nem létezett elfogadható magyarázat a fém-félvezetőkristály érintkezési pontján lezajló folyamatokra, de a kutatók úgy gondolták, hogy az egyenirányítás a kontaktus szinte mikroszkopikus felületén jön létre. Elgondolásuk szerint a fémből a kristályfelületre jutó elektronok egy potenciálgátat hoznak létre mikron nagyságrendű mélységben, míg a fordított polaritás ellentétes hatást eredményez.

A szakemberek javaslatot tettek a légiflotta kisméretű radarberendezésekkel való felszerelésére, amelyet a légügyi miniszter az atlanti csata kezdeti időszakában elért sikerek miatt szükségtelennek tartott, és ez a kutatást átmenetileg lelassította. (*Göring* első világháborús pilótaként ugyanis fölösleges luxusnak tartotta a radart, mondván: nincs szükség mozira a fedélzeten. Álláspontja akkor változott meg, amikor 1942 elején egy Rotterdam fölött lelőtt Stirling bombázó roncsai között megtaláltak egy tíz cm-en működő H2S berendezést.) Ezt követően a fejlesztési programot nagy sebességre kapcsolták, így ugyanazon év nyarára elkészült a szilíciumdiódával rendelkező prototípus – azonban mindez már későn történt.

A kutatás sziléziai áttelepítése után Mataré tovább folytatta a zajcsökkentésre vonatkozó kísérleteit. Kettős germániumdiódát konstruált, mivel feltételezte, hogy egy minden paraméterében egyező ikerdióda

alkalmas áramkörü megoldás révén kiolthatja a keverő zaját. A szimmetria fenntartása érdekében az érintkezési pontok egy milliméteren belül, tehát igen közel kerültek egymáshoz. Mérései során időnként váratlan jelenséggel szembesült, amely szerint a tűérintkezők 0,1 mm körüli távolsága esetén az egyik áramkörrel befolyásolhatta a másik kör áramát. Ezt a jelenséget interferenciának nevezte. A munkaprogram feszítettsége azonban nem engedett meg további kísérleteket, és amikor a front közeledése miatt sürgősen evakuálni kellett a laboratóriumot, sok értékes anyagot – köztük Mataré jegyzeteit is – a kedvezőtlen szállítási feltételek miatt meg kellett semmisíteni. A háború végül úgy ért véget Mataré számára, hogy kutatási terveit nem tudta valóra váltani.

A München közelében levő laboratórium 1944. októberi bombatámadása után Welker is eszközök és munkaprogram nélkül maradt. A harmincas évek során végzett kvantummechanikai tanulmányai alapján az 1945-ös év elején szűk keretek között, de foglalkozhatott elképzelésével: egy szilícium vagy germánium alapú erősítő elem megalkotásával. A kutatók ekkor már tisztában voltak azzal, hogy ennek előfeltétele a nagy tisztaságú félvezető előállítás. Germánium esetében Welker rendelkezett a szükséges ismeretekkel. A körvonalazódott eszköz egy olyan térvezérlésű tranzisztor volt, amelynek elképzelése ugyanabban az évben, jó néhány ezer kilométerre nyugatra W. Shockley-t is foglalkoztatta. Ebben a sé-mában egy fémlamezről keltett elektromos tér behatol a félvezető vékony rétegű felszíni sávja mögé, szabad elektronokat kihalászva az atomos kötésből, amelyek ilyen módon áramvezetőkké válnak. A félvezető sávra kapcsolt feszültség áramot indít azon keresztül, és a fémlamezen változtatható potenciál modulálhatja a sávon átfolyó áramot. Ilyen módon a kis bemeneti jelek a félvezető sáv nagy kimeneti áramait eredményezhetik. Azonban az 1945 márciusában végrehajtott kísérletek nem igazolták a feltételezett erősítést.

Ugyanazon a tavaszon a Bell Laboratóriumban is elvégezték ezeket a kísérleteket, amely hasonlóan bosszantó eredménytelenséggel zárult. A kudarcok *John Bardeen*t hamarosan a felszíni állapot egy szokatlan ideájához vezették: a szabad elektronok a félvezető felszínén csoportosulva leárnyékolják az elektromos teret, így az nem tud hatást kifejteni a mélyebb rétegekben. Ez a feltevés és W. Brattain ezután következő kísérletei a felszíni állapot fizikai természetére vonatkozóan a tűs tranzisztor 1947. decemberi felfedezéséhez vezetett.

Kudarcait követően Welker visszatért a germániumkutatáshoz, felújítva ismereteit a szupravezetésről, amelyről kénytelen volt lemondani a háború alatt. 1946-ban a francia és angol titkosszolgálat érdeklődött a háború alatti radarkutatásokban való részvétele felől. Ezt követően felajánlottak neki egy kutató-fejlesztői állást a Westinghouse Párizsban működő leányvállalatánál, germánium-diódák katonai és távközlési alkalmazású fejlesztése és gyártása céljából.

Mataré hasonló módon került a francia céghez; így mindketten nagyon lelkesen láthattak munkához, amelyre Németországban nem kínálkozott lehetőség. Beindították a germániumtisztítás és -kristályosítás műveleteit és hamarosan termelni kezdett egy gyártósor is. 1947 végére megengedhették maguknak, hogy felújítsák kísérleteiket, amelyek elsősorban Mataré interferencia-jelenségének magyarázatára összpontosultak. Újból összeállítva az ikerdiódás áramkört, sikerült rekonstruálni a háború alatt észlelt jelenséget; sőt a következő év elején számottevő erősítést is elértek. A müncheni Deutsches Museumban látható, dátum nélküli feljegyzés szerint Welker úgy vélekedett, hogy a „vezérlő elektróda” által keltett elektromos tér megváltoztatja a másik elektróda alatti terület vezetőképességét. Mataré azonban azon a véleményen volt, hogy amennyiben a jelenséget a sztatikus erőtér okozza, úgy a másik elektródán áramcsökkenést kellene tapasztalniuk (ellentétben a műszerekkel, amelyek áramnövekedést jeleztek). A térvezérlési idea alapján ugyanis a pozitív feszültségű vezérlő elektróda elektrontöbbletet kell, hogy eredményezzen a másik elektróda körzetében, amely növeli a kiürített réteg vastagságát, és így áramcsökkenést kellene okoznia. A magyarázat végeredményben csak az lehet, hogy a vezérlő elektróda révén pozitív töltéshordozók (lyukak) injektálódnak a germánium felületébe, aminek következtében növekszik a vezetőképesség és az áram.

1948 júniusára stabil és reprodukálható eredményhez jutottak, így alkalmasnak látták az időt arra, hogy bemutassák az új erősítő eszközt a PTT (Posta, Telegráf és Telefonszolgálat) államtitkárnak. Sajnos ez nem valósult meg egyéb elfoglaltság vagy a kellő érdeklődés hiánya miatt.

1948. június 30-án érkezett a hír az Atlanti-óceán túloldaláról, hogy a Bell Laboratóriumban megtartott sajtóértekezleten bejelentették a tranzisztor feltalálását. A részletekről pedig a *Physical Review* július 15-i száma tudósított. Megdöbbenéssel értesültek a leírásban szereplő eszközről: egy germánium lapka, melyen két, egymáshoz igen közel elhelyezett tűérintkezővel kapcsolódtak az áramkörre. A hasonlatosság rendkívüli volt.

Az események ettől kezdve Párizsban is felgyorsultak. A német tudósok augusztus 13-án benyújtották szabadalmi kérelmüket a francia Ipari és Kereskedelmi Minisztériumban; a leírás tartalmi részére kétségkívül hatással volt Bardeen és Brattain akkor már alaposan kidolgozott elmélete, ugyanakkor Mataré igazolva érezte magát a pozitív töltéshordozó injektálásának elméletével. Beindítottak egy korlátozott kapacitású gyártást, amelynek eredményét az 1949 májusában megtartott sajtókonferencián mutatták be. Az első alkátrészek (a PTT igénye alapján) a Párizs–Limoges telefonvonal erősítőiben kerültek felhasználásra.

Az amerikaiak érdeklődése sem maradt el. Először *Alan Holden* vizsgálta meg a transzisztront, és azzal a véleménnyel kommentálta Shockley-nak írt levelében, hogy: „ezt a francia ügyet nehéz lesz kibogozni,

Herrn

Dr. Welcker,
München.

Lieber Herr Welcker!

Haben Sie vielen Dank für Ihren Brief. Über Ihre Theorie der Supraleitfähigkeit haben wir hier schon viel diskutiert und natürlich auch mancherlei Wenn und Aber gefunden. Was den Einwand betrifft, den ich seinerzeit Herrn Prof. Sommerfeld gesagt hatte, hat mich Ihr Brief ziemlich beruhigt. Es gibt aber noch andere Bedenken, über die ich aber noch ausführlich mit Hund sprechen möchte bevor ich Ihnen schreibe; denn Hund hat sich mit dem Problem der Supraleitung noch mehr beschäftigt als ich selber. Sie werden also in einiger Zeit noch einen weiteren Brief über die ganzen Fragen bekommen.

Wie geht es Ihnen eigentlich sonst in München unter Ihrem neuen Chef? Sollten Sie irgendwelche Schwierigkeiten haben, bei denen ich Ihnen helfen kann, so stehe ich Ihnen natürlich gern zur Verfügung.

Mit vielen Grüßen auch an Professor Sommerfeld
Ihr

W. Heisenberg.

19. ábra. Werner Heisenberg levele Heinrich Welckerhez a szupravezetésről 1940 februárjában.

amennyiben tőlünk függetlenül jött létre”. 1950-ben pedig Shockley és Brattain egy Párizs–Algír közötti telefonbeszélgetés kapcsán, személyesen győződhetett meg a félvezetők európai hasznosításáról: „That’s quite something” volt Shockley véleménye.

Sajnos sem a francia kormány, sem pedig a Westinghouse nem kívánta kihasználni a helyzetet. Hiroshima után ugyanis a közvélekedés szerint az uralkodó tudomány a nukleáris fizika lett; sokan a beköszöntő atomkorszakban látták a jövőt, és nem az elektronikában.

Welker és Mataré még két éven át küzdött találmányuk elismerése és hasznosítása érdekében, de a megértés és támogatás csökkenése végül is arra kényszerítette őket, hogy hazájukba visszatérve máshol keressenek munkát [3, 4].

Elméleti szilárdtestfizikusok

Végezetül azokról a teoretikusokról, akik a szilárdtestfizika bizonytalan területekre vezető keskeny ösvényét biztonságosan széles útra változtatták.

A Heisenberg, Schrödinger és Dirac által kidolgozott kvantummechanika volt a kiindulási alap. A kristályok esetében Wigner Jenő és Frederick Seitz végzett úttörő munkát. Az 1911-es német definíció (halbleiter) mindössze csak arra a megkülönböztetésre utalt, amely szerint a félvezető anyagok az elektromosan jó vezetők és a szigetelők között találhatók. Az áttörést Alan Wilson a Cambridge-i Egyetem fizikusa hozta (volna meg), amikor 1931-ben megjelentette a félvezető elektronika elméletéről írt tanulmányát (*The Theory of Electronic Semi-Conductors*) [5], amely a svájci Felix Bloch és a német–angol Rudolf Peierls, a félvezetők viselkedéséről alkotott modelljének adaptációja volt. Munkájában kifejtette, hogy a félvezetők elektromos sajátosságai a kristályban található, különböző fajtájú szennyező atomok jelenlététől, illetve

koncentrációjától függ. Az áramvezetés korábbi elméletét kiegészítette a pozitív töltéshordozók definíciójával, amely eredetileg néhány évvel korábban Rudolf Peierls kvantumfizikai tanulmányában jelent meg először. (Első ízben ő írta le a szennyezett félvezetőkben jelenlevő lyukakat és megállapította, hogy a töltéshordozók jelenléte szolgál magyarázattal a félvezetők elektromos viselkedésére). A következő évben Wilson kísérletet tett az egyenirányítás magyarázatára, azonban kielégítő módon erre csak 1938-ban került sor. Egymástól függetlenül, a Szovjetunióban Abram Ioffe és Boris Davydov, Angliában Nevill Mott és Németországban Walter Schottky arra a meggyőződésre jutott, hogy az elektronok felszíni koncentrálódásának következtében létrejövő gát az okozója az aszimmetrikus áramfolyásnak [10]. A negyvenes évtized második felében – különösen a Bell Laboratórium kutatói által végzett munka nyomán – az elmélet és a gyakorlat egyre inkább összekapcsolódott, és a szilárdtestfizika tudománya ezekből az eredményekből teljesedett ki mai formájában.

Jelen tanulmány egy Nobel-díjjal végződő folyamat előtörténete is lehetne. A Bell Laboratóriumban folytatott intenzív kutatómunka azonban – különösképpen a második világháborút követően – céltudatosan vezetett el a tús tranzisztor felfedezéséig. A szerzett tapasztalatok – és nem utolsósorban William Shockley állhatatos ragaszkodása a rétegranzisztor teóriájához – azt eredményezték, hogy a kutatóknak sikerült megszabadulni az „analógiás következtetések” alapján kialakított elméletektől, amelyeknél „szilárdtestben” próbálták reprodukálni a vákuumtérben lejátszódó folyamatokat. És ezzel kezdődött el ténylegesen a félvezetők korszaka.

Irodalom:

1. Kristálytriódák. *Rádiótechnika II/11* (1952) 254–257.
2. T. H. Lee: *The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits*. Chapter One: A Nonlinear History of Radio. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2004.
3. M. Riordan: How Europe Missed the Transistor. *IEEE Spectrum* (2005. nov.) 46–48.
4. A. Van Dormael: The “French” Transistor. *Proceedings of the 2004 IEEE Conference on the History of Electronics*, Bletchley Park, England, 2004.
5. N. A. Teichholtz: *A history of semiconductor research*. Massachusetts Institute of Technology, 1967, 9–21.
6. R. Bray: *The Origin of Semiconductor Research at Purdue*. http://www.physics.purdue.edu/about_us/history/semi_conductor_research.shtml
7. M. Riordan, L. Hoddeson: The origins of the pn junction. *IEEE Spectrum* 34/6 (1997) 46–51.
8. <http://www.computerhistory.org/semiconductor>
9. <http://v3.espacenet.com/>
10. J. Margolin: *The road to the transistor*. <http://www.jmargolin.com/history/trans.htm> 2004.
11. Szombathy Cs.: A rétegranzisztor felfedezése. 2. rész. *ELEKTRONET IX/3* (2000) 87.
12. Egyéb irodalom:
<http://www.wikipedia.org/>
W. Shockley: The Path to the Conception of the Junction Transistor. *IEEE Transactions on Electron Devices* 23/7 (1976)
Balázs T.: A tús tranzisztor keletkezéstörténete (1839–1947). *Fizikai Szemle* 43/3 (1993) 104–108.
Rékai J.: Egy korszakváltó találmány 60 éves évfordulójára. *Rádiótechnika LVIII/12* (2008) 674–678.