

EGY KIS FOTONIKA

ELŐADÁSSOROZAT

HAJDÚ QTC 2009.

Szerző: Zentai Tibor HA2MN

A kiadvány szabadon terjeszthető, ára kizárólag a nyomdai előállítás költségét fedezi!

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó	3
Egy kis fotonika – 1. rész	4
Egy kis fotonika – 2. rész	5
Egy kis fotonika – 3. rész	6
Egy kis fotonika – 4. rész	7
Egy kis fotonika – 5. rész	9
Egy kis fotonika – 6. rész	10
Egy kis fotonika – 7. rész	11
Egy kis fotonika – 8. rész	12
Egy kis fotonika – 9. rész	14
Egy kis fotonika – 10. rész	15

ELŐSZÓ

E sorozat elkészítésének aktualitását az Európai Unió azon döntése generálta, miszerint az általános világítási célra készülő wolframszálas izzólámpa gyártásának fokozatos beszüntetése 2009. szeptemberétől veszi kezdetét. Az energiatakarékosságot célzó és a környezetvédelminek mondott döntés felveti azt a kérdést, hogy vajon megérett-e az idő ilyen drasztikus intézkedés végrehajtására? Rendelkezésre állnak-e azon új technológiák, amelyek a célkitűzéseknek megfelelően teljesítik a követelményeket és műszakilag teljes értékűen helyettesítik-e Edison zseniális találmányát, az izzólámpát? Az izzólámpát, mint a napfény spektrális eloszlásához legközelebb álló fényforrást, egyszerűsége ellenére több mint 100 éves fejlesztői munka tette hasznossá és pótolhatatlanná a világítástechnikában. Vajon rendelkezünk-e ma olyan energiatakarékos, mind a gyártás, mind az üzemeltetés során környezetkímélő és gazdaságos, műszakilag hasonló paraméterű eszközzel, amelyről bátran elmondható, hogy íme, ez a fényforrás a jó öreg izzólámpa trónfosztója?

A válasz részben igen, részben nem.

Az izzólámpa helyettesítésére fordított néhány évtizedes erőfeszítés felszínre hozott új világítástechnikai eszközöket, amelyek részben megmaradtak a vákuumtechnikai technológiák körében (fénycsövek, kompakt fénycsövek), részben pedig elvezetnek a szilárdtest technológia világába (LED-ek). Az izzólámpához időben viszonyítva gyerekcipőben járó szilárdtest fizika fejlődése lehetővé tette a szilárdtest fényforrások megalkotását, technologizálását, azonban a paraméterek összehasonlítása azt mutatja, hogy a fejlesztés még messze nem ért véget.

A fotonika másik nagy területe az elektronikai alkalmazásoké. E területre az előadások csak érintőlegesen hatolnak be, noha a lézerdiodák és a napelemek világa számos izgalmas, a jövőt teljesen átformáló lehetőséget ígér. Tudomásul kell azonban venni, hogy a szilárdtest fizika fejlődésben lévő tudomány, s a legnagyobb áttörés - *a szilíciumlapkára integrálható lézerdioda* - egyelőre várat magára. Amint a gyakorlatban használhatóan kifejlesztik, az információtechnológia forradalmi változáson fog keresztül menni.

A szóban elhangzott előadások számára kiszabott időkerettel és a szóbeli közlés sajátosságaival élve messzemenően törekedtünk átfogó képet adni a fotonika jelenlegi helyzetéről és a jövőbeni nagy célokról. Emiatt az előadásokban mellőztük az egyes jelenségek mélyebb tárgyalását, pontos, szakszerű leírását. A szakember számára méltán kifogásolható elnagyoltság ellenére remélhetőleg sikerült valós képet adni a fotonika érintett területeinek jelenlegi eredményeiről és a fejlődési irányokról.

BUDAPEST 2009. december

HA2MN

Egy kis fotonika - 1. rész

A fényvel foglalkozó tudományt fotonikának nevezzük.

Kezdjük mindjárt a Nappal. A Nap olyan természetes fényforrás, amely aktív csillagként fényt bocsát ki magából. Közbevetőleg – rádióamatőrként – megjegyezzük, hogy a továbbra is hiányzó napfoltok nem annyira a fénykibocsátásukról nevezetesek, sőt e foltok olyannyira hiányoztak a Napon 2008-ban, hogy az elmúlt évszázad során csak 1915-ben mértek kevesebbet, mint az előző évben. Ez közel évszázados rekord.

De térjünk vissza a fényhez. A Nap fénye teremti meg a létfeltételeket a földön. E kisugárzott fényt nagyjából fehér fénynek is nevezhetjük, mert spektrális eloszlása a 400-700 nm-es tartományban, ha nem is teljesen egyenletes, de legalább nem hiányos bármely hullámhosszra vizsgálva. A puding próbája, ha megeszik, azaz a déli napsütésben egy fehér papírlapot valóban fehérnek látunk. A fehér fény a legösszetettebb, azaz minden hullámhosszú fények keveredésének eredménye. Ugyanezen fehér papírlap késődelután már sárgás színű, alkonyatkor akár rózsaszín is lehet. Noha az agyunk továbbra is fehérnek hiszi, mert úgy tudjuk, hogy a lap a déli napfényben fehér volt. A fekete szín a fényvisszaverődés teljes hiányát jelenti, tehát egy nagyon sötét éjszakán a fehér papírlap fekete lesz, amely könnyen ellenőrizhető egy piros LED segítségével. Ugyanis a piros LED-del megvilágított papírlap szép piros lesz, noha továbbra is úgy gondoljuk, hogy fehér.

Apropó LED – azaz a világító dióda. A hosszas bevezetéssel tulajdonképpen éppen ide akartunk kilyukadni. Az elektronika forradalmi felfedezése a tranzistor karrierjének csúcán áll, manapság már hallani lehet a molekuláris tranzisztorról is. Mondjuk egy molekuláris LED-nek sok értelme nem lenne, inkább növekednie kellene e nem is oly régóta ismert fényforrásnak, azaz az ég felé törnie képletesen, de méreteiben mindenféleképpen. Mert hogy világítani lehet(ne) vele, hiszen legalább hússzor kevesebb energiát igényel azonos fényáram létrehozásához, mint a hagyományos izzólámpa. Noha már manapság is használunk LED-es világítást, nem hiszem, hogy a rádióamatőr ilyen fényben forrasztgatná az SMD alkatrészeket is tartalmazó nyomtatott áramköri lapjait.

A mesterséges világítás első elektromos eszköze az izzólámpa lett. Edison izzója elszenesített bambusz szállal működött, a maiak tekercselt wolframhuzalt használnak és mind a mai napig verhetetlenek az 4000-6500 K fokos színhőmérsékletű igazi fehér fény utánpótlásában. Csak két apró probléma van velük: *nagyon nagy az energiafelvételük igen kicsi hatásfok mellett, a másik pedig a korlátozott (általában 1000 óra) élettartam.* De van olyan is, amelyik egy másodpercet sem él meg, a bekapcsolás után látványos villanással adja vissza lelkét gyártójának.

Nos, a LED-et nem ilyenek ismerjük. Szép színes fényel világít, főleg a kevésbé fényes környezetben. De világít, és minimális energiát fogyaszt. És nem ezer órát, inkább annak sokszorosát. De ismerünk már nagy fényerejű változatokat is, sőt olyat is, amely megpróbálja a fehér fényt megközelíteni (valójában gyakran piszkosszürke, kékbe hajló fény az eredmény (megjegyezzük - ennél még a sárga is jobb). Zseblámpának megteszi, esetleg egy úszó jégtáblán felállított, SOS jeleket sugározni kényszerülő rádióállomás megvilágításra is, de másra nem igazán alkalmas. Ma még.

A következő részben olyan mesterséges fényforrást próbálunk keresni, amely talán valamennyire hasonlít az éppen még folttalan napunk fényére.

- *** -

Egy kis fotonika - 2. rész

Fotonikai barangolásunk során térjünk vissza a minden elektromos energiával üzemeltetett mesterséges világítások királyára, az izzólámpára. Köztudott, hogy a wolframszálon áthaladó áram fehér izzásig hevíti a szálát. A bevezetett villamos energia általában 5-10%-a alakul fényvé, a maradék energia hőt termel. Tehát egy 100 W-os izzólámpa 5-10 W-atnak megfelelő fényt termel, 90-95 W-at teljesítménnyel pedig a környezetét fűti.

Noha fénye szép fehér és kiválóan alkalmas a természetes napfény helyettesítésére, már itt látszik, hogy meztelen a király. Mindenek ára energiapazarlásban és környezetszennyezésben jelentkezik. Ma még a villamos energia jó része fosszilis energiahordozók elégetéséből keletkezik, ez pedig tovább növeli a föld légkörének terhelését széndioxiddal, kéndioxiddal, higannyal és uránnal (üvegházhatás, savas esők, mérgező, esetleg radioaktív nehézfémek).

Az izzólámpa, mint a legrosszabb hatásfokú fogyasztó, elkergetése az elektromos fogyasztók seregéből mára szinte befejezett tényként kezelhető de...

De mi van helyette? Maradjunk a történelmi sorrendnél. Az idősebbek bizonyára emlékeznek a neoncsőnek is nevezett fénycső nevű borzalom megjelenésére. A fénycső vékony, alacsony nyomású gázzal töltött üvegcső, melyek végein elektródák találhatóak. Nagyfeszültség hatására a csőben található gáz fényleni kezd. Hatásfoka, azaz fényátalakítási képessége 35-40 %, esetleg több is lehet, de...

A korai villogó, rettenetes színű fénycsövek ugyan sokat változtak, változott az üvegcső belsejét bevonó fényporok minősége is, viszont az izzólámpának megfelelő valódi fehér fény gerjesztése máig komoly kívánnivalókat hagy maga után. Másik probléma, hogy a fénycső úgynevezett lineáris eszköz, azaz a pontszerű fényforrásnak tekinthető izzólámpával szemben vonalszerű sugárzó. Tehát minél hosszabb, annál nagyobb fénytelteljesítményt produkál. Nagy terek megvilágítására alkalmas, de nem terjedt el a lakásokban és fehér fényű, nagy fényerejű, koncentrált világítást követelő munkahelyeken.

A probléma gyökere a fénypornak azon tulajdonsága, hogy nem egyenletes színképű fényt bocsát ki, a spektrális teljesítmény-eloszlása nem lineáris a látható fény-tartományban, azaz „sávos” a színképe. Ez a probléma minden következő fényforrás problémája is lesz, ámbár a LED-ek esetében már nem fényporról, hanem színkonvertáló anyagokról fogunk beszélni.

Tehát egy átlagos fénycső fényében a fehér papírlap színe valójában nem lesz fehér, csak mi gondoljuk annak. A fénycső gyújtási technikája szintén sokat fejlődött, az 50/60 Hz-es váltakozófeszültség miatt létrejött, az emberi szemre és idegrendszerre káros villogást először a fényporok tulajdonságainak javításával, később a nagyfrekvenciás, kb. 40 kHz-et előállító tápegység bevezetésével javították. E tápegységek felharmonikusai viszont hozzájárulnak az elektromágneses szmog növeléséhez.

A közvilágításban és a nagyon nagy terek megvilágításában terjedni kezdett az úgynevezett higanygőzlámpa. E lámpák elsődleges jellemzője a monokróm szín. Eleinte kékesfehérben, később narancssárgában tündököltek, de más változatok is léteznek. A higanygőzlámpa szintén gázkisülésen alapulva működik, emiatt igen jó fényhasznosítású. A monokromitás következtében viszont használata erősen korlátozott. A monokromitás azt jelenti, hogy csak egy hullámhosszon sugároz, ezért a színes tárgyról csak ennek a hullámhossznak megfelelő fény fog visszaverődni. E lámpák nem alkalmasak lakások

megvilágítására, már csak azért sem, mert a bekapcsolást követően hosszú percek múlva érik el a teljes fényáramukat.

A következő fejlődési lépcső a kompakt fénycső. A kompakt fénycső nem egyéb, mint a klasszikus fénycső modern változata. Az izzólámpa kiváltása érdekében a kompakt fénycső üvegcsövét összeviszsa tekergetik, hajlítják, annak érdekében, hogy egy izzólámpához hasonló kubatúrát próbáljanak leutánozni. Gyújtása elektronikus úton történik, nagyfrekvenciás tápegységről üzemel, gyenge minőségénél ez igen káros a felharmonikus tartalom szempontjából. A bekapcsolást követően azonnal világít, de bizonyos idő szükséges a teljes bemelegedéshez, azaz a névleges fényáram kibocsátáshoz. A spektrális teljesítmény-eloszlása szintén nem lineáris, viszont hatásfoka alig valamivel rosszabb a fénycsőénél.

A gázkisülésen alapuló fényforrások élettartama többszöröse az izzólámpának. Ha az elektronikus táp vagy a gyújtó nem megy tönkre idő előtt, a fénypor lemerülése miatt fényáramuk fokozatosan csökken, így a hatásfok is romlik az üzemeltetési idő függvényében. A kompaktfénycső csöelrendezés alapján fénye kvázi-pontszerű is lehet, de messze lineárisabb, mint az izzólámpa. Alkalmas lakóterek általános megvilágítására, viszont nem alkalmas koncentrált, erős, valódi fehér fényt igénylő munkavégzéshez.

A következő részben a LED-et, mint lehetséges fényforrást vizsgáljuk.

- *** -

Egy kis fotonika - 3. rész

Az Electrical World 1907. február 9-i számában H. J. Round úr, a neves feltaláló, a következőket ajánlja a szerkesztőség figyelmébe (szó szerint idézve):

„Uraim!

A szilíciumkarbid (más néven karborundum) kristály más anyaggal érintkező aszimmetrikus áramvezetési tulajdonságainak vizsgálata közben az alábbi jelenséget figyeltem meg: 10 V-os potenciálkülönbségű feszültséget a szilíciumkarbid kristály két pontjához vezetve, a kristály sárgás fényt bocsátott ki. Csak néhány mintán lehetett jelentős fény keletkezését elérni ezen alacsony feszültségen, 110 V esetében már jóval több minta produkált ragyogó fényt. Néhány kristály csak az élein világított, míg mások a sárga helyett világoszöld, narancssárga és kék fényt produkáltak.

Round úr a leírása végén további vizsgálatra ajánlja e jelenséget, és örömmel venné, ha mások is visszaigazolnának megfigyeléseit.

Úgy tűnik, hogy Round úr cikke az első híradás arról, hogy a világító dióda, vagyis a LED „fel van fedezve”. A jelenség leírása abban a korban nem keltett különösebb figyelmet, az 1960-as évek elejéig bizony néhány évtizednek el kellett telnie ahhoz, hogy a világító dióda iparilag megvalósított alkatrészként vonuljon be akkor még az elektronikai alkatrészek egyre bővülő tárházába. A szilíciumkarbidra, (a kék LED) viszont még továbbra is várni kellett.

Közbevetjük, hogy hasonló a története a mai MOSFET tranzisztornak is. Az első FET (valójában metall semiconductor FET – MESFET) szabadalmi kérelem 1926-ban datálódik, s 1934-ben meg is kapja a szabadalmi védelmet. A MESFET, magyarul fém-félvezető

térvezérlésű tranzisztor, noha a mai elnevezés a működési elvre utal, s nem az akkori megnevezésre. Emiatt a Bell Laboratories 1948-ban és 1949-ben kénytelen visszavonni a FET-ekre vonatkozó szabadalmi bejelentéseit. Kínos! A történetre később visszatérünk.

1907-ben tehát ismertté vált, hogy egy szilárd anyag félvezető, s hogy ez az anyag áram hatására fényt bocsát ki magából. Ez az anyag pedig nem más, mint a szilíciumkarbid.

Ismerkedjünk meg vele!

A szilíciumkarbid tulajdonképpen egy szilícium molekula és egy szén molekula igen szélsőséges körülmények között létrejött tartós házasságának eredménye (vegyjele: SiC). Felfedezője Edward Goodrich Acheson (1893 körül), aki nemcsak felfedezte, de jól meg is gazdagodott belőle megalapítva a Carborundum Társaságot. E cégnél elektromos olvasztókemencében gyártották a szilíciumkarbidot (két grafit elektróda között olvasztják meg a szilíciumdioxid (vagyis a homok) és a szén keverékét, s ma is ugyanígy gyártják. Ezen anyagot rendkívüli keménysége miatt csiszolóanyagként is használták és használják többek között ma is. Elvileg, tehát ha veszünk egy darab smirglit, és feszültséget kapcsolunk rá, világítania kellene. Persze a dolog ennél bonyolultabb.

A szilíciumkarbid a földgolyón rendkívül ritka. Első, s szinte a máig egyetlen természetes lelőhelyeként az arizonai *Diabolo* meteorkrátert találták meg. Mostanra ez a lelőhely kimerült, köszönhetően a lelkes korabeli amerikai rádióamatőröknek, akik detektoros vevőikhez gyűjtötték e kristályokat, no meg a mihaszna geológusoknak és a ritka ásványokat továbbértékesítési céllal gyűjtögetőknek. Ugyanis a szilíciumkarbid meteorok becsapódásakor keletkezik leginkább, tehát az ipari alkalmazásokban csak mesterségesen gyártott formában létezik.

A szilíciumkarbid számos ipari felhasználása ismert, többek között kiváló hővezető, ugyanakkor nem olvasható meg. 2700 C fokra hevítve, a folyadékállapotot kihagyva elpárolog. Jól bírja a radioaktív sugárzást. A kristálystruktúra módosításával a gyémánthoz hasonló szerkezetű és tulajdonságú anyag keletkezik, ezért gyakran alkalmazzák az ékszeriparban a gyémánt helyettesítésére is.

Noha elektromos, elektronikai és az 1907-ben publikált fotonikai tulajdonságait már viszonylag jól ismerjük, de még mindig nem eléggé. A szilíciumkarbid ugyanis a jövő félvezető anyagának ígérkezik, amelyről a következő részben bővebben értekezünk.

- *** -

Egy kis fotonika - 4. rész

Amikor az előző részben a szilíciumkarbid kristályba vezetett elektromos áram által gerjesztett fénnel kapcsolatos, Round úr 1907-es leírása alapján azt állítottuk, hogy a LED fel van fedezve – némileg túloztunk. Igaz ugyan, hogy a szilíciumkarbid félvezető, igaz ugyan, hogy akár a természetes állapotban talált vagy a mesterségesen gyártott kristályok esetében az áram hatására valóban fény keletkezhet, azért még némileg távol vagyunk attól, hogy e kristályokat iparszerűen alkalmazható világító diódának tekintsük.

A kvantummechanika és a szilárdtest fizika fejlődése eredményezte az első igazi LED-eket évtizedekkel később. S nem is a szilíciumkarbid, de nem is a szilícium lett e diódák alapanyaga, hanem az első időkben a galliumarzenid.

A világító dióda pontosan ugyanazon az elven működik, mint az ionizált neon gázzal töltött, rózsaszínes - narancsszínű fényt kibocsátó fénycső. A vonatkozó kvantumfizikai elv a következő: amikor az elektronok áramlásuk során egy magasabb energiaszintről alacsonyabb energiaszintre kerülnek, specifikus frekvenciájú sugárzás keletkezik. Az ionizált neon közegben való energiavesztés rózsaszín-narancs, a hidrogén esetében piros, míg a higanygőz esetében kék fényként jelenik meg e specifikus sugárzás. Egyébként minden kémiai elem ionizált állapotához hozzárendelhető egy, csakis az adott elemet jellemző sugárzás, s ezen az elven alapul a színeképelemzés.

Egy p-n átmenetű standard szilárdtest dióda esetében a két réteg közötti átmenet rekombinációja során ez a sugárzás hő formájában, mondhatnánk úgy is, hogy infravörös fényként is észlelhetően jelentkezik az áram hatására. Triviálisan szólva: a dióda annál jobban melegszik, minél nagyobb áram folyik át rajta. Amennyiben megváltoztatjuk a normál félvezető diódában alkalmazott félvezető kristályszerkezetét, igénybe véve a különböző kémiai elemek tárházát, eljutunk olyan megoldásokhoz, amelyeknél e specifikus sugárzás a látható fény tartományában keletkezik. Egyszerűen szólva e diódákban az átmeneti rétegben a nyitóirányú áram hatására fény keletkezik, azaz úgy világítanak mint az izzólámpa, azaz ezen a ponton mondhatjuk valójában, hogy a LED fel van fedezve.

A LED-ek tulajdonságaival a későbbiekben foglalkozunk, most visszatérünk a szilíciumkarbidra.

A szilíciumkarbid, akár természetes körülmények között jött létre (meteorbecsapódás), akár mesterségesen gyártott, rengeteg szennyeződést tartalmaz. Ennek megfelelően kristályszerkezete inhomogén, ismeretlen szennyeződésekkel teli. Ha a *Diabolo* kráterből, vagy az elektromos kemencéből kiemelt kristállyal kísérletezünk, jó esély van arra, hogy elektromos áram hatására fény is keletkezik. Emellett a dióda tulajdonságait is felfedezhetjük, hiszen a detektoros vevőkhöz is alkalmazható az aszimmetrikus, inkább egyirányú áramvezetési tulajdonságai miatt, csakúgy, mint az általunk jobban ismert természetes vagy mesterséges galenit kristály. Jól emlékszünk arra, hogy e kristályokon mindig meg lehet találni azokat a pontokat, amelyeknél az előzőnél kedvezőbb egyenirányítást kapjuk. Ennek oka az, hogy a kristályszerkezet inhomogenitása miatt mindig van egy olyan hely, amely minden korábbi helynél jobb vételt (ha fény, jobb fényt) biztosít. Innen ered a rádiótechnika szépsége: mindig találunk egy jobb megoldást egy adott feladat megoldására.

De mi a helyzet magával a szilíciummal? A szilícium döntő fontosságú félvezető anyaga az elektronikának. Ugyanis a legegyszerűbb diódától kezdve a legbonyolultabb mikroprocesszorokig a szilíciumot használjuk a félvezető alkatrészekben, s ide a szilícium csipekbe (amelyekben a p-n rétegeket a homogén szilíciumlapkán lokális szennyezéssel alakítják ki), más kémiai kombinációjú kristályt a gyártástechnológia miatt nem lehet alkalmazni. S ez baj, nagyon nagy baj.

A következő részben a szilícium háza táján nézelődünk, s felfedezzük, hogy bármennyire is fejlett az integrált áramkörök világa, a szilíciummal kapcsolatban még egy nagyon fontos fotonikai problémát sürgősen meg kellene oldani.

- *** -

Egy kis fotonika - 5. rész

Az előző részben a szilíciumkarbidtól távolodva alkotóeleme, a szilícium felé kezdtük fordítani a figyelmünket. A szilícium az oxigén után a földön második leggyakrabban előforduló kémiai elem, a földkéreg 25,7%-át teszi ki. Igaz nem elemi, hanem különféle vegyületek formájában. Közismert pl. a kvarc, amely apró törmelékként a homokban található, ugyanakkor más fellelhető szilíciumvegyületek palettája is széles.

A szilícium a modern félvezetőipar (dióda, tranzisztor, ic, rezonátor) alapanyaga. Ugyanakkor fotonikai alkalmazása egyelőre a napelemekre és a fényérzékelőkre korlátozódik, további alkalmazási lehetőségek évtizedek óta intenzív kutatás alatt állnak. Ugyanis a szilícium, ellentétben a szilíciumkarbiddal, masszívan ellenállt annak, hogy fénykibocsátó tulajdonságokat mutasson.

Ez pedig a következő problémát veti fel: a mai csipekhez szükség lenne olyan gyors adatbeviteli és kiviteli megoldásra, amely a lassú, hullámterjedési tulajdonságok miatt korlátolt elektromos vezetők helyett közvetlenül üvegszálak optikával történjen az adatbevitel, adatkivitel.

Nagyjából közismert, hogy a mai, nagy sebességű integrált áramkörök extrém tisztaságú szilíciumlapkán készülnek a megfelelő szennyező anyagok diffundáltatásával (a p és az n típusú rétegek kialakítása érdekében). E lapkákon jelenleg nem lehet kialakítani fényt kibocsátó áramköri elemeket. Amennyiben ilyen lapka létezne, a hagyományos huzalozás helyett üvegszálakkal lehetne összekötni az integrált áramköröket, s ez jelentős mértékben felgyorsítaná a jelfeldolgozást, mondhatni minőségi ugrást hozna az adatfeldolgozásban és a távközlésben.

A szilíciumból, sok évtizedes kutatás után, a 2000-es évek elején sikerült laboratóriumi körülmények között elektromos áram hatására fényt nyerni. Szép, halványzöld fényt gerjesztettek egy tükröfényesen csillogó szilíciumpanellel.

Eredmény, de nem érkeztünk meg. Sok millió dollárt fordítottak a világon a fotonikai félvezetők kutatására, s az addig kitalált, de a fotonikában annyira óhajtott szilícium végre világított. A probléma azonban mégsem oldódott meg, ugyanis az üvegszálak optikai adatátvitelhez koherens, azaz lézert fény kell. A szilíciumlapkán tehát lézert diódákat kellene kialakítani a következő technológiai ugrás megvalósításához.

Közbevetjük, s a következő részekben mélyebben foglalkozunk is velük, hogy a világítódiodák széles választéka létezik. Közöttük ott vannak a lézert diódák is. Két alapvető gond azért maradt: a galliumarzenid, indium fénykonvertáló és sok más alapanyagú dióda nem integrálható a szilíciumlapkára, másrészt ezek a kémiai elemek ritkák és hozzávetőlegesen százszorosan vagy több százszorosan drágábbak, mint a homokból is előállítható szilícium alapú félvezetők.

A szilíciumból készíthető lézert diódákkal kapcsolatos kutatási irány az ún. Raman-lézer elv felé mutat. A Raman-lézer elv sem új találmány. 2002-ben a University of California mutatott be Raman-elvű, szilícium-alapanyagú lézer jelenséget, 2005-ben az Intel demonstrált egy második generációs megoldást. Ez a megoldás már képes folyamatosan üzemelni egy szilíciumcsipen. Az akkori elvárások szerint 2010-ben megvalósulhat a fény alapú számítástechnika technológiája.

Ennek jelét egyelőre nem látjuk, noha az alapvető áttörés megtörtént. Ha visszagondolunk arra, hogy az első FET tranzisztor szabadalom 1926-ban került benyújtásra és az ötvenes években kezdték csak gyártani a szabadalmazott elvű tranzisztort, pesszimistán

szemléltethetnénk a dolgokat. Valójában a FET-re azért kellett sokat várni, mert a gyártástechnológiai (az általános technikai) fejlődés jóval később tette lehetővé az iparszerű gyártást. Ma a technikai fejlődés exponenciálisan felfutó, meredek szakaszában vagyunk. Megvan tehát a remény arra, hogy az elkövetkező években a fotonikai elvű számítástechnika és kommunikáció egy új korszak nyitánya legyen. Képzeljük el számítógépünk alaplapját rézvezetékek és forrasztások nélkül!

- *** -

Egy kis fotonika - 6. rész

Az előző részben a szilícium fotonikai jövőjéről értekeztünk, különös tekintettel a szilíciumcsipre integrálható lézerdíoda megalkotásának szükségességére és az ebből eredő, majdani forradalmi változásra az adatfeldolgozás és adatátvitel területén.

Jelen értekezésben áttekintjük a gyakorlatban leginkább elterjedt, az általunk alkatrészként nagyon jól ismert fényt kibocsátó szilárdtest eszközöket, vagyis a fényforrás diódákat, azaz a LED-eket.

Mint korábban már szó volt róla, a P-N átmeneten áthaladó elektron veszít energiájából. Az elveszített energia a közönséges dióda esetén hővé alakul. Amennyiben a P-N átmenetet úgy alakítjuk ki, hogy az átmenetbe olyan réteget építünk, amely a hő helyett az átvezetett elektron energiavesztésének nagy részét a látható, illetve a látható fényhez közeli tartományú sugárzássá konvertálja, fénykibocsátó szilárdtesthez jutunk, azaz eljutottunk a LED-hez. Megjegyezzük, hogy a LED nem csak fény kibocsátásra alkalmas, ugyanis képes a környezetből fényenergiát is felvenni és ezt az energiát villamos áram formájában terhelésen leadja. Ezt a tulajdonságot felhasználva jutunk el a fényérzékelő szilárdtest konstrukcióhoz (fotodióda, fototranzisztor). A LED konstrukciója olyan, hogy ritka kivételtől eltekintve fény kibocsátásra optimalizálják, a továbbiakban ezzel foglalkozunk.

A legelső (máig is használatban lévő) LED konstrukció négy réteget tartalmaz. Az alapra (szubsztrát) felviszik az N-típusú réteget, arra az aktív (fénykibocsátó) réteget, arra pedig a P típusú réteget. A felhasznált anyagok a gallium, az arzén és egy speciális anyag – azaz a fénykonvertáló anyag. Erre a kombinációra áramforrást kapcsolva erős fény kibocsátása történik meg. Amennyiben az aktív réteget megfelelő anyagokból alakítjuk ki, piros, zöld, sárga, narancs és infravörös fényt kapunk. A későbbi generációkban megjelenik a kék és az ultrabolya, még később pedig az ibolyaszín. Ezek a hagyományos – korai, bár ma is használatban lévő LED-ek.

A kék, zöld és piros fényű LED-ek fényét egy lencsén átvezetve (keverve) eljutunk a fehér fényig, illetve e fények kombinációjával a színspektrum bármely árnyalatát képesek vagyunk előállítani (RGB-LED), illetve egy tokba építve több, monokróm színű LED is előállítható.

A LED konstrukciójából látszik, hogy elektromos szempontból egy olyan diódáról van szó, amelynek a nyitóirányú feszültsége eltér a klasszikus germánium (0,1-0,2 V) és a szilícium diódákétól (0,5-0,7 V). A legalacsonyabb nyitóirányú feszültség egy klasszikus LED-nél 1.2 V körüli, a legmagasabb 3 V közelében van. A klasszikus LED záróirányú letörési feszültsége viszonylag alacsony, 6 V körüli érték a jellemző. A technológia fejlődésével a záróirányú feszültség jelentősen emelhetővé vált, azonban a klasszikus LED-et váltakozó áramú körbe kötve egy ellenirányú párhuzamos diódával védeni kell a polaritásforduláskor előálló záróirányú letörés elkerülése érdekében.

A LED-et áramszabályozott eszközként kell szemlélnünk. A klasszikus LED maximális árama nem haladhatja meg a 20 mA-t. Az áramot szabályozva a LED fényereje arányosan növekszik, illetve csökken, a kibocsátott fény spektruma viszont nem változik. A LED-et ezen tulajdonsága teszi különösen vonzóvá a világítástechnikusok számára, hiszen más fényforrások fényereje egyáltalán nem, vagy bonyolult technikával szabályozható. Az izzólámpa kivétel, de a fényerő csökkenés a színspektrumot jelentősen megváltoztatja (csökkentéssel a vörös felé tolja). Másik előny, hogy a zöld, kék, piros kevert fényű (egylencsés) LED-ek kibocsátott fényének spektruma (színe) a három szín intenzitásának változtatásával kiválóan szabályozható.

Meg kell jegyezni, hogy a klasszikus LED nem használható világítástechnikai célokra, kimondottan jelzőfényként és kijelzők háttérvilágításaként alkalmazzák. Az 5 mm-es tokozású vörös LED záróirányban jól alkalmazható kapacitásdiódként, ha a szabályozási tartomány igénye nem nagyobb 5 pF-nál és a szabályozófeszültség pedig 5 V-nál nem nagyobb.

A LED-ek speciális kialakításával fejlesztették ki a lézerdiódát. A lézertény tulajdonsága, hogy monokróm, azaz egyszínű, továbbá fáziskoherens, azaz a fényhullámok azonos fázisban vannak, emiatt egymást erősítik és rendkívül szűk nyalámban, egy irányba tartanak. A lézertechnológia alkalmazása rendkívül széleskörű és közismert.

A következő részben a LED technológia legújabb fejleményeivel ismerkedünk meg.

- *** -

Egy kis fotonika - 7. rész

Mint közismert, 2009. szeptember hónap elejétől az Európai Unióban megszűnt a 100 W-os izzólámpa gyártása, az elkövetkező évek során pedig fokozatosan beszüntetik a kisebb teljesítményű izzók gyártását is. A közösségi döntés indoka energiatakarékosság.

Vajon melyik világítástechnikai eszköz váltja fel az izzólámpát? Nos, jelenleg a kompakt fénycső az egyetlen, gazdaságosnak és elfogadható árúnak tekinthető fényforrás. Aki visszaemlékszik a sorozat elején, szőrmentén tárgyalt kompakt fénycsőre, nem lesz igazán lelkes. Az európai média a váltás kapcsán vizsgálni kezdett a kompakt fénycső körül és számos problémát jelzett a műszaki paraméterek és a környezeti ekvivalencia tekintetében.

Legfontosabb kérdések a színhőmérsékleti eloszlás, a fényáram, az élettartam, a környezet kímélése, a gazdaságosság, a világítási teljesítmény és komfort szubjektív megítélése és nem utolsósorban a fogyasztói ár tekintetében vetődnek fel. Szánjunk egy, egy mondatot e paraméterek jellemzésére.

Előtte azonban jegyezzük meg, hogy a kompakt fénycső, ellentétben az izzólámpával, a bekapcsolás után bizonyos idővel éri el fényáramát (bemelegedés), továbbá káros kisugárzása (kb. 40 kHz) jelentős és közeli (30 cm-en belüli) használat szempontjából veszélyes, továbbá villódzhat, tehát e szempontokból már nem is azonos az izzólámpával.

A színhőmérséklet tekintetében még a legdrágább gyártmányok sem teljesítik az izzólámpa viszonylagos egyenletes, a napfényhez hasonló spektrális eloszlását, bár igyekeznek a szemnek kellemes, melegfehér típusokat gyártani.

A fényáram (teljesítmény/fényáram megfeleltetés) szintén kívánivalókat hagy maga

után, ugyanis a kommersz termékek legtöbbszörének dobozán egy teljesítménylépcsővel nagyobb megfeleltetési teljesítmény van megadva az izzólámpához viszonyítva.

Az élettartam tekintetében ötszörös (5-7000 óra van specifikálva), azaz ezen idő alatt esik e fényáram az új kompaktfénycső által kibocsátott érték 80%-ára, noha az elektronika miatt van olyan gyártmány, amely az egytized másodpercet sem éli meg az első bekapcsolás után. Továbbá a kompaktfénycsőt nem lehet állandóan kapcsolgatni. Ha az első bekapcsolást túlélte, nem biztos, hogy a következőket is túléli, ám bár e tekintetben az izzólámpa is okozhat meglepetést.

Még egy fontos tulajdonságot meg kell említeni: a kompakt fénycső vonalsugárzó, tehát szórt fényt szolgáltat. Emiatt a kontraszthatás lényegesen rosszabb a megvilágított felületen, ezért a valóságos teljesítmény-megfeleltetett fényáram esetén is a szemünk kevesebb fényként érzékeli a fényforrás által kibocsátott fényt. Vagyis nehezebb olvasni és jó kontrasztot kívánó tevékenységet végezni kompaktfénycsős megvilágításnál. Nem is ajánlott!

Környezeti szempontból a kompaktfénycső a higanytartalom és a fénykonvertáló bevonat + a gyújtóelektronika miatt veszélyes hulladék.

A kompaktfénycső akkor gazdaságos, ha olyan célra használják, ahol terek általános, hosszú idejű (nem kapcsolt), színhőmérsékletre nem érzékeny megvilágítását szolgálja. A legdrágább típusok elfogadhatóak lakások belső, általános világítására. Valóban energia megtakarítás érhető el velük, azonban műszakilag és legtöbbször szubjektíven sem helyettesítők a hagyományos izzólámpáknak.

Tekintettel a felsorolt hátrányok összességére, megjósolható, hogy a kompaktfénycső átmenet. A megoldás az általunk oly jól ismert LED-ek irányába mutat, s az első lépések valóban meg is történtek. A nagy fényerejű, világítástechnikai célokra alkalmas LED már viszonylag hosszú ideje (a 90-es évek óta) létezik, viszont a korábban felsorolt, az izzólámpának megfeleltethető fotonikai paraméterek elérésének tekintetében még hosszú évek kutatására van szükség. A nagy fényerejű LED-ek galliumnitrid alapúak. Tulajdonságaikat a következő részben vesszük górcső alá.

- *** -

Egy kis fotonika - 8. rész

Előzőleg az aktualitás okán tett kitérőben már utaltunk arra, hogy a LED-től reméljük az energiatakarékos, napfény-közeli spektrumú és fényességű gazdaságos világítási megoldások megjelenését. Az első lépcsőn túl vagyunk; a LED évtizedek óta létező elektronikai alkatrész. A második lépcsőfokra való fellépés a '90-es évek eleje óta tart, az első áttörés a nagy fényerejű LED-ek megalkotásával ekkor vált valóra. Ezen LED-ek alapanyaga a galliumnitrid.

A galliumnitrid rendkívül kemény anyag, igen nagy hőkapacitással rendelkezik. Ellenáll a mechanikai hatásoknak, repedésnek, vékony rétegű filmként pedig felhordható zafír vagy szilíciumkarbid lapkára. A galliumnitrid szilíciummal vagy oxigénnel történő szennyezésekor „N” típusú réteg, míg magnézium szennyező bevitelkor „P” típusú réteg keletkezik. A szilícium és magnézium ugyanakkor rontja az eredeti kristályszerkezeti tulajdonságokat, törékennyé teszik azokat.

A galliumnitrid félvezető rendkívül érzékeny a statikus feszültségre, viszont

meglehetősen magas energiasávval rendelkezik, melynek értéke 3,4 eV. Ez az érték kiváló az optoelektronikai alkalmazások tekintetében, s nem mellékesen ez az anyag érzékeny az ionizáló sugárzásra is. E tulajdonságát űreszközök napelemeként hasznosítják. A galliumnitridből nagy teljesítményű és nagy fénykibocsátású LED-ek készíthetők, s mivel kiváló nagyfrekvenciás tulajdonságokat is mutat, nagy teljesítményű, mikrohullámú tranzisztorok is készülnek e kristály felhasználásával.

A galliumnitridből készült, első iparilag alkalmazott LED-ek alapvetően nagy teljesítményű kék, továbbá hosszú élettartamú ibolya lézer diódaként terjedtek el. A galliumnitrid alkalmasnak mutatkozott még ultraibolya szenzor és nagy sebességű FET tranzisztor előállítására is.

A kezdeti galliumnitrid LED továbbfejlesztés segítségével, az alapszínnek konvertálásával alkalmassá vált arra, hogy napfény színű, nagy fényerejű LED-dé váljon. A technológia azonban bonyolult, még manapság is számos megoldandó problémával szembesülnek a fejlesztők. E problémák között megemlíthető a törekvés a fényerő és a hatásfok növelésére, a sávhiányos színkép javítására, a nagyobb teljesítményű világítótesteknél a veszteség hő hatékony elvezetésére (mivel ezeknél egy szubsztrátra nagyobb vagy több diódát integrálnak) és természetesen a fogyasztói ár csökkentése sem utolsó tényező.

A fentiek alapján tekintsük át a jelenlegi helyzetet. A jelenleg gyártott nagy fényerejű, fehér LED-ek nagyjából 70 lumen/Watt fénykibocsátásra képesek. Emlékeztetőül ez az érték az izzólámpa 12 lumen/Wattjával áll szemben, azaz a LED e szempontból hatszorosan hatékonyabb. Az intenzív kutatást folytatók jelentkeznek időnként jobb fénykibocsátási értékekkel, laboratóriumi körülmények közötti elért eredményekkel. A mai célérték, hogy iparszerű gyártásba lehessen vinni egy 100 lumen/Watt fényteljesítményű LED-et, ugyanakkor egyes kutatók jelentései szerint elérték a 150 lumen/Watt fényteljesítményt is. Természetesen laboratóriumban.

A klasszikus fehér LED (ami nem igazán fehér) galliumnitridből készül, keskeny sávú kék fényt sugároz és fénykonvertáló anyag segítségével a kéket elnyeli és sárgává konvertálja. Ebből a sárga fényből szinte teljesen hiányzik a vörös spektruma. Ezt javítandó még egy vörös fényre konvertáló anyagot kell hozzáadni, hogy valamennyire megközelítsék a szemnek is kellemes lakótér világítást. Ez a lépés csak próbálkozásnak minősíthető. A galliumnitrid félvezetőt indiummal is kombinálják, az alapszín a indium/gallium aránytól függően a zöld és az ultraibolya közé állítható be. Jelenleg az 1x1 mm-es lapkákra épített LED-ek tekinthetők általánosnak, noha ezek tokozása különleges kialakítást igényel a veszteség hő elvezetésének biztosíthatósága érdekében.

A mai kutatások alapján úgy tartják, hogy 2015-re várható olyan technológiai eredmény, amely a LED-es világítóeszközök széles körű elterjedését fogja megalapozni. A következő részben a jelenleg létező LED-es lámpatestek világában kutakodunk.

- *** -

Egy kis fotonika - 9. rész

Mielőtt körülnéznénk a LED-es lámpatestek világában, újabb fejleményről nyílik alkalom beszámolni. A nagy fényerejű galliumnitrid LED-ek előállítására azért használnak drága zafír lapkát, mert a galliumnitriddel nagyjából azonos hőtágulási tulajdonságú hordozóra van szükség. Ugyanis a lehűléskor és a felmelegedéskor keletkező szerkezeti feszültségek által okozott repedések csak így kerülhetők el. Egy angol találmány szerint járulékos alumínium-galliumnitrid réteg beillesztésével a hőtágulásból eredő problémák kiküszöbölhetővé váltak, ezáltal a LED-et alkotó rétegek felvihetőek olcsó szilíciumlapkákra is. A találmány egy újabb lépés a nagy fényerejű LED gyártási költségeinek csökkentése felé.

Mielőtt továbblépnénk, meg kell vizsgálni egy olyan problémát, amely a LED-es világítótestek és lámpatestek kialakítására kihat. A wolframszálas izzólámpa hatásfokából eredően a fényre alakított teljesítmény 5-10 %, tehát a hő formájában megjelenő teljesítményvesztés 90-95%. A hő az izzólámpa esetében sugárzás formájában távozik, lényegében a tér minden irányába. Ebből következően magát a világítótestet lényegesen kisebb fajlagos hőterhelés éri, s ennek is csak egy része jut tovább a világítótestre és magára a lámpatestre.

A LED, mint félvezető fényforrás, esetében a helyzet idézőjelben „csak” annyiban különbözik a wolframszálas izzótól, hogy a LED a veszteségi teljesítményt nem sugárzással, pusztán hőelvezetéssel képes leadni. Igaz ugyan, hogy a veszteségi teljesítmény lényegesen kisebb, mint izzólámpáé, viszont kizárólag a lapkára koncentrálódik megjelenése. Az 1x1 mm-es lapka hőterhelése ezáltal olyan mértékű lesz, hogy a felmelegedés következtében a félvezető rétegek hamarosan tönkremennek. Ez a kis fényerejű LED esetében nem gond, viszont a nagy fényerejű LED lényegesen nagyobb teljesítményű, emiatt a veszteségből keletkező hő elvezetése komoly hűtést igényel. A hővezetés miatt a világítótestben keletkező hő vezetéssel a lámpatestnek adódik tovább, így a lámpatest hűtéséről is gondoskodni kell, főleg nagyobb teljesítmények koncentrációja esetén.

A LED-es világítótest lehet maga a LED - lámpatestbe rendezve több lapkából vagy egy lapkán több LED-ből, de gyártanak izzólámpával kompatibilis kubatúrájú, belül magát a lapkát tartalmazó világítótestet is. Ez esetben szellemes megoldást is alkalmaznak, a világítótestet hűtése érdekében az üvegburát elektromosan szigetelő, de jó hővezető képességű folyadékkal töltik fel. Természetesen e világítótestek sem tartoznak az olcsó, kommerciális kategóriába.

Tehát probléma a nagy teljesítményű LED-es világítótestek és lámpatestek kialakítása. Ezeknél a hűtőbordás megoldások terjedtek el, ennek megfelelően különleges kialakításúak és rendkívül drágák. A LED-es világítás hátránya az is, hogy tápegységre, igényesebb esetben szabályozóegységre van szükség. Ezek tovább bonyolítják a termék bonyolultságát, energiavesztését és az előállítás költségeit növelik.

Minden energiagazdálkodási, szabályozhatósági és élettartamukból adódó előnyök ellenére a LED-es világítási megoldások ma még általában nem tekinthetők megfizethető áru, széles körben elterjedt, az izzólámpás megvilágítás felváltására azonnal és hatékonyan használható eszközöknek. Az ördög a részletekben rejlik, s a széleskörű elterjedésig ezernyi részlet vár még megoldásra. Míg az olyan egyszerű szerkezet, mint a wolframszálas izzó kutatására és finomítására évtizedek mentek el, a mai felgyorsult világban 5-10 éven belül a LED-es világítás széleskörű, kommerciális elterjedése várható.

Amikor LED-es világítótestekről és lámpatestekről beszélünk, rendkívül széleskörű alkalmazási területek rendkívül széleskörű igényeit kell figyelembe venni. A háztartási szórt és

koncentrált fényű megvilágítási igények mellett az iparban igen változatos igények jelentkeznek, gondoljunk csak a járműipari alkalmazások specialitásaira. A elektronikai kijelzők világítása és az egyéb speciális igények megint mást kívánnak. A háztartási és térvilágítási alkalmazás szabványosítási igénye nyilvánvaló, ez a munka meg is kezdődött. A LED-es világítás jövője beláthatatlan és szinte az egyetlen alternatívája lesz a megszűnő izzólámpának. Idővel...

- *** -

Egy kis fotonika - 10. rész

A sorozat utolsó előadásához érve vegyük számba azokat a fotonikai eszközöket és eredményeket, amelyeket az előadás során nem, vagy csak érintőlegesen említettünk meg.

Félvezetős fotonikai, de inkább fogalmazzunk úgy, hogy a szilárdtest eszközök két alapeleme létezik. Ezek egyike a fényt érzékelő, a másik pedig a fényt kibocsátó eszköz. A fényérzékelők hatalmas fejlődésen mentek keresztül, ezek közé tartoznak a szenzorok, a fényelemek és képalkotó eszközök.

A szenzorok lényegében egyszerű eszközök (általában fotodióda, fotótranszisztor), mint ahogy a kis teljesítményű fénykibocsátású eszközök (általában LED) is. A fényelemek, más néven napelemek, a fény- és az ionizáló sugárzás elektromos energiává való átalakítását végzik. E területen intenzív szilárdtest kutatás folyik a hatásfok növelése érdekében. A napelemek elsődleges energiaforrásoknak tekinthetők az űrkutatásban, másodlagosnak földi energetikai alkalmazásoknál. A képalkotó eszközök kombinált fényérzékelők, nekik köszönhető a nagy felbontású képalkotás. Ezen alkalmazás oly mértékben elterjedt, hogy a hagyományos kémiai fototechnikát szinte teljes kiszorította a köznapi gyakorlatból, s a naprendszer mellett a világegyetem egyre távolabbi részeinek felderítésében is kiemelkedővé vált a szerepe.

A szilárdtest fénykibocsátó eszközök legígéretesebb jövőbeni alkalmazásai részben a lézertechnológia, részben a nagy teljesítményű fényforrások szempontjából érdekesek. A szilíciumlapkán kialakítható lézerdióda forradalmasítani fogja az informatikát és az adatátvitelt. Az üvegszál optikai vezető ki fogja váltani a számítástechnikai eszközök hagyományos fém vezetőkezelését, ezáltal az adatfeldolgozási sebesség a szilíciumlapkára integrált processzorok fizikai hatáira növekszik. Azaz az úgynevezett hagyományos, vezetőlámpából épített sínrendszer megszűnik, így a továbbiakban nem lesz frekvenciafüggőség. Ezzel az adatok késleltetése és torzulása kiiktatódik az adattovábbítás útjából. A processzor csip az üvegszál optikai vezetőkkel közvetlenül kommunikál, az adatfeldolgozás sokszorosára gyorsul, az adatátvitel pedig fénysebességgel, sokszoros sávszélességgel valósul meg a mai adottságokhoz képest. E technológia egyetlen akadálya ma, hogy a szilícium lézerdióda kezdetleges formában sem létezik.

A nagy teljesítményű fénykibocsátó szilárdtest fényforrások ma már létező és a gyakorlatban alkalmazott eszköznek tekinthetők, de az általános, energetikai szempontból ideális és felhasználóbarát kialakítású fényforrások elterjedése még várat magára. Alapvetően három problémával állunk szemben:

- 1.) A fénykibocsátás hatásfoka tovább javítandó
- 2.) A fény spektrum eloszlás (valós fehér fény) tovább javítandó (jobb fénykonvertáló

megoldásokra van szükség).

- 3.) A szilárdtest fényforrás és a lámpatest hőterhelés miatti szerkezeti kialakítása optimalizálendő és szabványosítandó.

Ahhoz, hogy a világítási célú, energiatakarékos, felhasználó- és környezetbarát, hosszú élettartamú, gazdaságosan előállítható szilárdtest fényforrásokig eljussunk, jelentős kutatómunka van még előttünk. A fotonika e területe azonban ígéretesnek látszik; az elkövetkező évtized jelentős előrelépést, a korábbi technológiák leváltását hozhatja.

A világítástechnikával kapcsolatban megemlített, ma még elterjedt kompaktfénycső vélhetően csak átmenet a izzólámpa és a szilárdtest fényforrás között. S egy utolsó szózuhatag a világítástechnikáról: a fogyasztó azt várja el, hogy a fényforrás egyszerű legyen, olcsó legyen, energiatakarékos legyen, elegendő fényt adjon, kontrasztos legyen, s a fény pedig olyan legyen, hogy egy fehér papírlapot megvilágítva a papírlap fehér legyen. Nem melegfehér, nem hidegfehér, valódi fehér legyen. De ez még mindig nem elég; a piros piros, a zöld zöld, a kék pedig kék legyen.

Vajon olyan nagy kívánság ez...?

Ezzel a fotonikai előadásorozat végére értünk. Látszólag messze jártunk a rádióamatőr hobbitól, valójában a hobbiiban is jól ismert építőelemekről, alkatrészekről, informatikai elemekről és a hobbi gyakorlásához szükséges világításról értekeztünk a magunk módján.

Kihasználva az alkalmat, minden rádióamatőr társamnak nagyon kellemes ünnepeket, eredményekben és napfoltokban gazdag, boldog Új Esztendőt kívánok 2010-ben!

Jegyezte: HA2MN

2009. március-december