

Braun Tibor

■ ELTE Kémiai Intézet, MTA Könyvtár és Információs központ | braun@mail.iif.hu

Rubik-kockával a világűr kutatásban

Ionos folyadékokkal hajtott nanoműholdak



Előszó

Valószínűleg kevesen hinnék el nekünk, hogy a Rubik-kockának szerepe lehet az űrkutatásban. Ezért már most bevalljuk, hogy csak egy metafora erejéig választottuk e dolgozat főcímét, és a részletekre majd később visszatérünk. Azonban el kell ismernünk, hogy a Rubik-kockát sikerei, elismertsége és anyagi eredményei már feltalálása óta jelképesen a csillagok közé repítették. Humorosan még azt is hozzátehetnénk, hogy átvitt értelemben a Rubik-kocka esetleg úgy is felkerülhetett az űrbe, hogy valamelyik nemzetbeli űrhajós magával vitt egy példányt az űrkabinba annak érdekében, hogy szabadidejében azzal szórakozzon.

Bevezetés

A Szovjetunió 1957. október 4-én repítette az űrbe a Szputnyikot [1], és ezzel elindította a világot az űrkutatás és -megismerés útján. Ez a relatíve kisméretű, körülbelül 80 kg súlyú műhold képtelen volt saját magát vezérelni, helyzetét meghatározni, és pontosan csak annyi energiával rendelkezett röppályáján, hogy alkalomadtán rádiójeleket küldjön a Földre. Ennek ellenére kitaposta az utat, ami számos eljövendő alkalmazást hozott, hogy csak néhányat említsünk, az időjárás előrejelzését, a globális kommunikációt és a GPS-navigációt.

Történelmi sikereik ellenére az űrtechnológiák távol maradnak számos ország anyagi lehetőségeitől. Miközben a műholdak képességei egyre nőttek, tervezésük és építésük az idők folyamán is költséges maradt. Nemrég azonban a helyzet változásnak indult, amikor akadémiai és ipari kutatók bevezették a szabványosított kis műholdak építését. A Stanfordin, a Moreheadi Állami Egyetemen

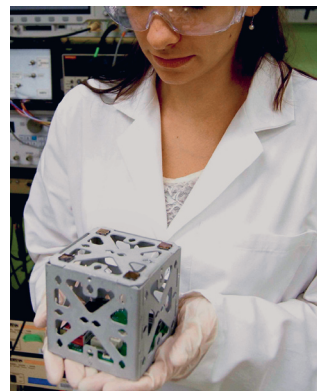
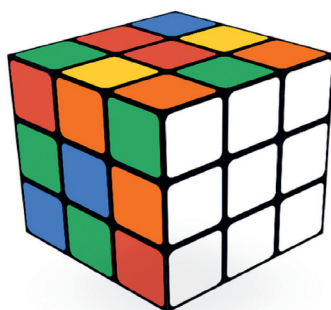
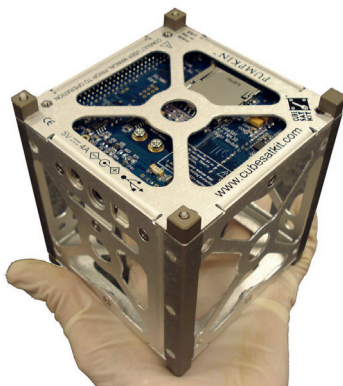
(Kentucky) és a Kaliforniai Műszaki Egyetemen meghatározták ezen műholdak méretét és formáját azzal a céllal, hogy méretük és súlyuk folytán olcsón vagy ingyen eljuttathatók legyenek az űrbe, a nagyobb műholdak fedélzetén. Ez az általuk meghatározott méret világszerte szabvánnyá vált, amit azóta Cubic Satellite-nek, azaz CubeSatnak rövidítettek és használnak [2] (1. ábra).

A fentiek után visszakanyarodhatunk az említett metaforához, ugyanis az angolul CubeSatként említett kocka-nanohold külső mérete nagyjából megegyezik a Rubik-kocka méretével.

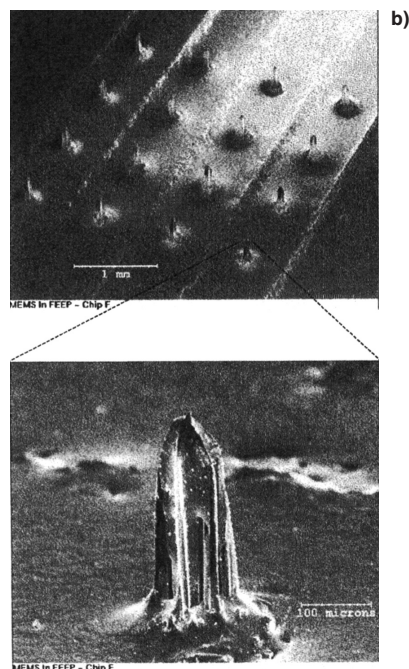
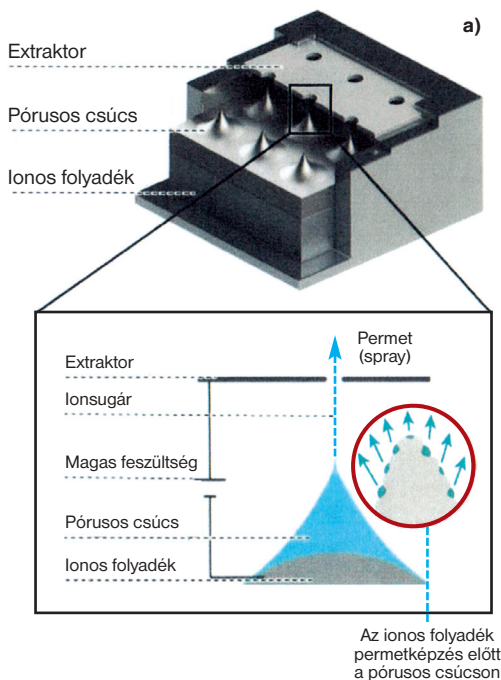
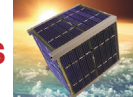
A CubeSat nanoműholdak

A CubeSatokat „U” (Unit)-egységekként tartják számon. Alapméretük 10×10×10 cm, súlyuk 1,5 kg. Szükség esetén az alapegységek száma növelhető. Az egységnyi CubeSat hosszát például legőszierűen megduplázva 2U, hármat téve egymás mellé 3U egységhez jutunk, és így tovább. A fenti többszörös egységek természetesen többszörös hasznos súlyt, illetve berendezést hordozhatnak. A CubeSat egységek jelenleg alacsony költségeik következtében például egyetemeken megépíthetők, működtethetők.

Mint már említettük, a CubeSatok egyik alapvető vonzereje, hogy olcsón az űrbe kerülhetnek. Ezeket nagyobb műholdakkal, vagy rakétákkal bocsátják fel, amikből a CubeSatokat kibocsátják, miután a hordozók eljutottak az űrbe. Annak ellenére, hogy a más típusú és osztályú műholdak száma alapvetően évek óta változatlan, vagy aránylag lassan növekedett, a röppályára állított és az űrben keringő CubeSatok száma drámaian emelkedett és e nanoműholdak száma mostanra 1000 fölé nőtt. Ma már egy nanoműhold képes feladatait nagyjából olyan funkcionálissá tenni, mint egy 1000 kg-os műhold.



1. ábra. Nanoműhold (CubeSat) méretének összehasonlítása a Rubik-kockával [2]



2. ábra. Az MIT által kidolgozott CubeSat-meghajtó berendezés.

a) Az átlátás érdekében jelentősen megnagyobbítva,

b) a pórusos kapillárisok csúcsméretei, mint látható, mikron és milliméter méretűek a valóságban [4], [6]

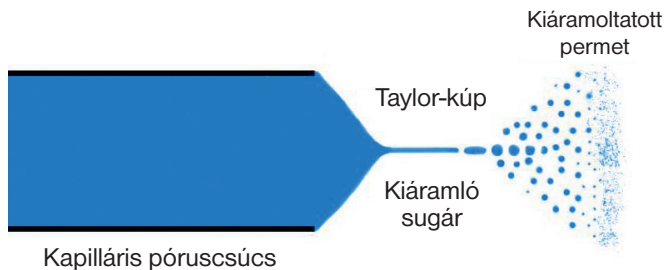
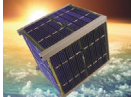
A fizika törvényei határokat szabnak a műholdakon működő, vagy működtethető szerkezeteknek, azok méretének, illetve miniatürizálásának. Szerencsére az ipari számítógép- és érzékelési technológiákból jelentős fejlettséget vittek át a CubeSat-technológiába. A CubeSatek kis méretük ellenére ma már nemcsak a Szputnyiknál hordoznak több tudást és lehetőséget, hanem néha a jóval nagyobb műholdakénál is. A mai CubeSatekbe például hőmérséklet-szabályzókat, rádióadókat és -vevőket, GPS-navigációt, helyzetmeghatározást és -ellenőrzést, valamint a régieknél sokkal jobb számítógépeket építenek be. Ugyanakkor hordozhatnak nagy teljesítményű hasznos terheket, például miniatürizált érzékeny digitális kamerákat és szenzorokat, amelyekkel röntgensugarakat, nagy energiájú részecskéket, űridőjárást, távoli csillagokat és bolygókat figyelhetnek meg, valamint a Föld mágneses terének szerkezetét is mérhetik.

A CubeSatek kémiai meghajtása és irányítása

A CubeSat típusú műholdak még sikeresebb alkalmazhatóságát hátráltatja jelenlegi aránylag nehézkes meghajtásuk és vezérlésük. Például nem könnyű a Földről beállítani, hogy megfigyelés céljából a nanoműhold melyik oldala forduljon a Föld irányába. Ezen felül időnként korrekcióra szorulhat a nanoműhold röppályája is. Mivel csak nagyon kevés energia termelődik a rajtuk lévő apelemekből, elengedhetetlen, hogy szükség esetén a meghajtásuk és tolóerejük is minél kevesebb energiát fogyasszon. Erre lehet megoldás a Massachusettsi Műszaki Egyetem (MIT) és a NASA erre a célra fejlesztett, miniatürizált berendezése (2. ábra) [4,5], amelyhez az ötletet a természetből merítették. A növények vízfelvétele ugyanis pórusos és kapilláris hatáson alapul. Ez azt jelenti, hogy a növény kapilláris pórusokon keresztül szívja fel a vizet a gyökerek szintjén, mely egyre kisebb és kisebb kapillárisokon jut el a törzsön keresztül az ágakig, majd a levelekig, ahol elpárolog. Az MIT és a NASA hasonló elven működő találmánya apró csúcsokból álló pórusos rétegből épül fel, amelyeken *ionos folyadékot* szívatnak át egészen a csúcsok külső felületéig, ahol a folyadék két elektród közötti elektromos feszültség hatására permet formában kiáramoltható a pórusos csúcsokból. A vizsgálá-

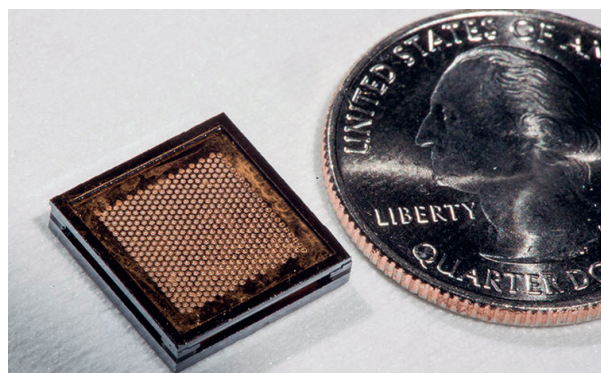
tok során pórusos fém-, műanyag vagy üveglapkákat használtak; ezekre, mint a 2. ábrán látható, feszültséget kapcsolva, az ionos folyadékpermet hajtóműként áramlik ki a pórusokból az áramlással ellentétes irányba mozgatva a nanoműholdat. A mérések szerint például 500 db pórusos csúccsal 50 mikronewton tolóerő fejthető ki, ami földi körülmények között mindössze egy papírlap mozgatására elegendő, de az űrbeli súlytalanságban már például 1,5 kg tömegű eszköz is mozgatható a segítségével. Az említett csúcsos lapkákra kapcsolt feszültség értékével változtatható a kiáramló ionpermet hajtóereje is, amivel pontos vezérlés valósítható meg.

Az MIT-NASA-találmány alapja az ionos elektropermet meghajtó rendszer (IEMR) (Ion Electro Spray Propulsion System) elnevezést kapta [5,6]. Az IEMR a már említett ionos folyadékokkal működik. Ezek pozitív és negatív ionjaik révén aránylag jó elektromos vezetők, és erős molekuláris kötésük azt jelenti, hogy minden további nélkül kitehetők a világűr vákuumának, gyakorlatilag párologás nélkül. Továbbá az ionos folyadékok hőstabilitása nagyon széles tartományban fennáll, körülbelül -100 és $+400$ °C között. Nagyon nagy elektromos erőnek lévén kitéve, az ionok a folyadék felületéről közvetlenül kiáramolhatnak. Kiszabadulva könnyen gyorsulnak, elérve a 30 km/s-nál magasabb sebességeket, ezáltal létrehozva a CubeSat-en a jelentős tolóerőt. Az ionos folyadékkal működő IEMR-berendezések jelentősen miniatürizálhatók. Ez tökéletes megoldás a CubeSat típusú nanoműholdakban való elhelyezésre. Mint említettük, az ionos folyadék az IEMR-berendezés pórusos csúcsaiban helyezkedik el (2. ábra), és a feszültség, mint az ábrán látható, a csúcs és az alsó elektród között képződik. Amikor egy kis térfogatú, elektromosan vezető folyadékot elektromos mezőnek tesznek ki, például egy pórusban (kapillárisban), a folyadék alakja torzulni kezd ahhoz az alakzathoz képest, amit a felületi feszültség egyedül hozna létre. Ha a feszültség növekszik, az elektromos tér hatása egyre kifejezettebbé válik. Amint megközelíti annak az erőnek az értékét a pórusban, amit a felületi feszültség hoz létre, kúpos alak kezd képződni domború oldalakkal és kerekített csúccsal. Egy bizonyos feszültségküszöb után az enyhén kerekített csúcs kúp formájává válik, és a folyadék sugárként kilövell. A kúpsugár kép-



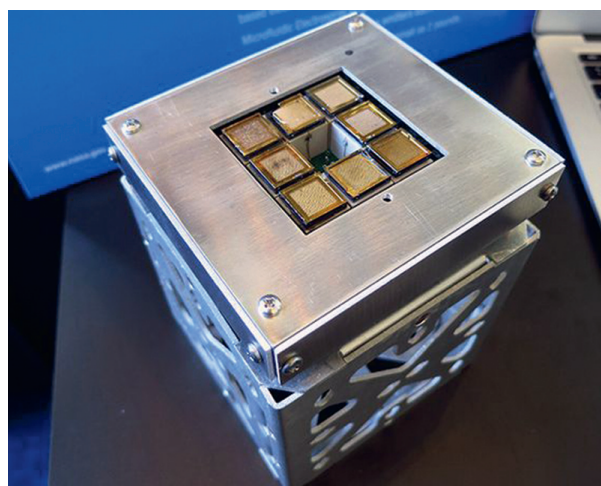
3. ábra. A Taylor-kúp következtében kialakuló ionos folyadék-permet kiáramoltatása

ződése az ionokat kijuttató elektropermetezési folyamat kezdete. A kúpformát először Geoffrey Ingram Taylor angol kutató írta le, 1964-ben, még mielőtt az „elektropermetezést” felfedezték. Ennek a róla elnevezett Taylor-kúpnak [9] (3. ábra) jelentős szerepe van az ionos folyadékpermet kialakulásában. Egyetlen ionkibocsátó csúcs csak néhány száz nanonewton értékű tolóerőt hozhat létre. Ez nagyon kevés még a Rubik-kocka méretű CubeSatek meghajtásához is, de egy IEMR-berendezés körülbelül 1000 kibocsátó csúcsot is magában foglalhat, és ezek egy levélbéllyeg nagyságú, 12×12×2,5 milliméter méretű modulba illeszthetők (4. ábra). A modulban levő néhány mikroliternyi ionos folyadékkal a pórusos csúcsokból a kiáramló permet körülbelül 5–20 mikronewtonnyi tolóerőt hozhat létre. Ez például a 1,5 kg-os CubeSat vezérlésére megfelelő lehet (5. ábra).

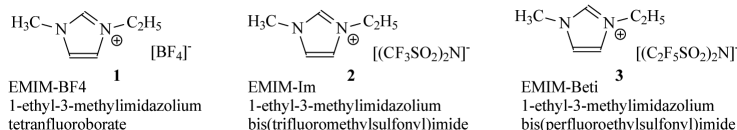


4. ábra. A 2. ábrán bemutatott berendezés modulként összeszerelve (meghajtóegyüttes) – egy 10 centes mellett. Méret: 11×11×2,5 mm

5. ábra. A CubeSatre szerelt 8 db-os ionos folyadékos meghajtó együttese [8]



Ezek után említést kell tennünk a CubeSat nanoműholdak meghajtására az IEMR-berendezésben leggyakrabban alkalmazott ionos folyadék fajtáiról. Ezeket a 6. ábrán mutatjuk be. A nagyon nagy számú ionos folyadék közül az MIT–NASA-feltalálók ezeket az űrben is működő folyadékokat kedvező fizikai tulajdonságaik miatt választották. A vegyületek elnevezése meglehetősen hosszú, ezért a szakirodalomban általában rövidítve szerepelnek. Nemcsak az IEMR-berendezésekben használt ionos fo-



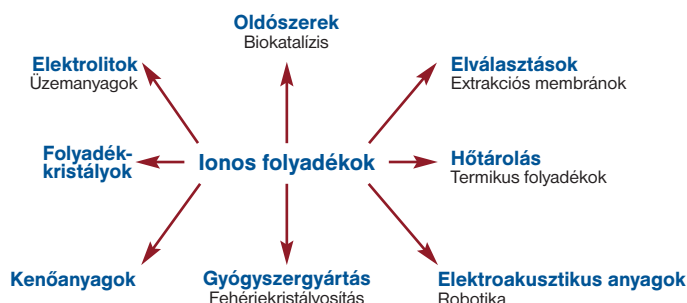
6. ábra. Az IEMR berendezés meghajtására alkalmazott ionos folyadékok [10]

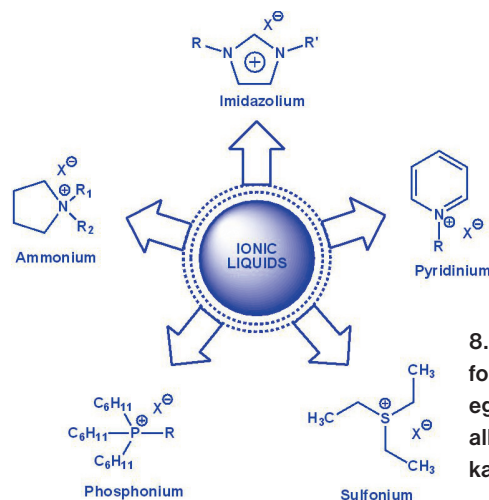
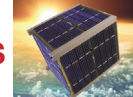
lyadékoknál, hanem sok más esetben is rövidítve használják a sók kémiai nevét. Például az 1-butil-3-metilimidazólium esetében a legismertebb rövidítés az EMIM, ami lényegében a különböző komponensek kezdőbetűit jelenti.

Ionos folyadékok (dióhéjban)

Az ionos folyadékok lényegében kationokból és anionokból álló alacsony olvadáspontú sók. Azokat a sókat, amik 100 °C-on és gyakran szobahőmérséklet alatt olvadnak, általában szobahőmérsékletű ionos folyadékoknak nevezik. Az első alacsony olvadáspontú só, az etil-ammonium-nitrát (C₂NH₈N₃) a német Paul Walden 1914-ben szintetizálta, és 12 °C-os olvadáspontját is leírta. Ő az ionos folyadékot az etil-amin koncentrált salétromsavval való semlegesítésével állította elő [14]. Bizonyos ismert ionos folyadékok nitrogént és foszfort tartalmazó heterociklusos (imidazólium vagy piridin) alkil-helyettesített kationokból és szervesetlen anionokból, mint például BF₄⁻, Cl⁻, PF₆⁻ vagy NO₃⁻ ionokból állnak. Mivel az ionos folyadékok komponensei változtathatók, ezek a vegyületek különböző speciális alkalmazásokhoz előre is tervezhetők. Más szavakkal az ionos folyadékok alkalmasak adnak specifikus tulajdonságaik beállítására megfelelő alkalmazásokhoz való használatnál (7. ábra). Ezért „tervezett (designer) folyadékok” elnevezéssel is illetik. A tulajdonságaik finombeállítása (hangolása) a kationba beépített alkilcsoportok lánc hosszának és/vagy elágazásainak, vagy az anionnak a megváltoztatásával történik. Ennek megfelelően az olyan tulajdonságok, mint az ionos folyadékok olvadáspontja, viszkozitása, sűrűsége és hidrofobicitása könnyen módosíthatók az összetevő ionok változtatásával [14]. Annak tulajdoníthatóan, hogy a legtöbb ionos folyadék olyan egyedi, hasznos tulajdonságokkal rendelkezik, mint például az

7. ábra. Ionos folyadékok alkalmazásai a kutatás és a fejlesztés különböző területein [11]



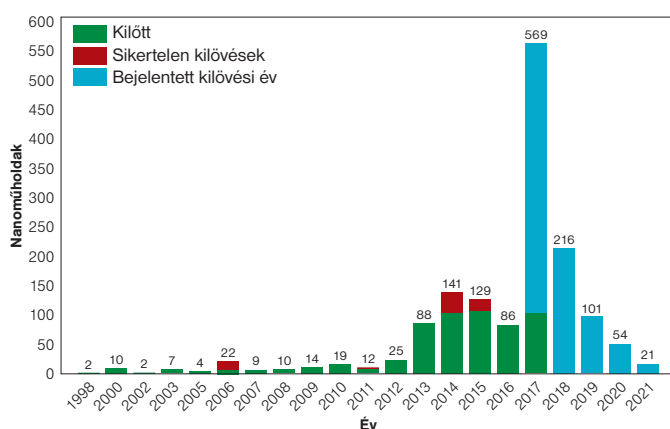


8. ábra. Az ionos folyadékok anionjaival együtt leggyakrabban alkalmazott szerves kationok

alacsony illékonyság [16], nagyobb hőstabilitás [17], alacsonyabb gyúlékonyság [18] és jó vezetőképesség [19], alkalmazásai nagy figyelmet kaptak az olyan kutatási területeken, mint az orvostudomány, kémia, fizika és mérnöki tudományok. Az ionos folyadékok esetében a kationokat 5 fő osztályba sorolják, ezek az ammónium, piridinium, imidazolium, foszfónium és szulfónium (8. ábra) [12]. A kationok általában nagy számú anionnal társulhatnak. Ezek például halogének (klorid, bromid, jodid), bisz(trifluorometán-szulfonimid) (NTF₂), tetrafluoroborát (BF₄), hexafluorofoszfát (BPF₆), oktilszulfát (OctOSO₃), acetát (Ac) és dicianid N(CN)₂ lehetnek, hogy csak néhányat nevezünk meg. Az anionos összetevő változtatása jelentősen befolyásolhatja az ionos folyadék tulajdonságait, például a hidrofobicitást, a viszkozitást és az olvadáspontot.

Meg kell jegyezni, hogy általánosságban a kation vagy anion méretnövekedése az olvadáspont csökkenéséhez vezet. Ennek megfelelően egy ionos folyadék olvadáspontja változtatható az anion-kation pár új változatával. Ennek megvalósítására járható út a só pozitívan töltött részének méretnövelése. Értelemszerű, hogy a szerves anionokkal más a helyzet, mert azokkal csak addig lehet méretet változtatni, amíg a periodikus rendszer elemei engedik. Így is csaknem végtelen számú ionos folyadék megtervezése válik lehetővé. A szakirodalomban megoszlanak a vélemények a megvalósítható ionos folyadékok lehetséges számáról. Az egyik vélemény ezek számát 10⁶-ra teszi a kationok és anionok megfelelő kombinálásával [12]. Egy másik becslés ezt a számot a lélegzetelállító 10¹⁸-nak írja le [11].

9. ábra. A világűrbe kilőtt CubeSatok száma és tervezett száma 2000 és 2021 között [22]



A CubeSatok elterjedtsége

Úgy véljük, hogy a CubeSatok alkalmazásáról is érdemes néhány részletet ismertetni. Amint a **9. ábrán** látható, ezeknek az apró műholdaknak az alkalmazása 2000-ben kezdődött és körülbelül 2013-tól kezdett igazán növekedni. Az is látható az ábrán, hogy 2021-ig már most jelentős tervek vannak a jövőben kilövendő nanoműholdakra.

Utószó

Az ionos folyadékok szakirodalmában az utóbbi években hatalmasra nőtt, ezért említettük az előző fejezet címében, hogy itt a területet csak dióhéjban ismertetjük. Részletek iránt érdeklődőknek ajánlunk például egy nagyon részletes összefoglaló dolgozatot [21]. Mint ezen írás teljes szövegéből kiderülhetett, a CubeSat nanoműholdak megalkotásával és igénybevételével jelentős előrelépés történt az űrkutatásban. Ebben a kémiának rendkívül meghatározó szerepe volt és van. Azonban külön ki szeretnénk említeni, hogy a CubeSat nanoműholdak másik, szintén nagyon nagy jelentősége abban áll, hogy megépítésük és működtetésük aránylag szerény költségen megvalósítható és ez hozzáférhetővé teszi őket az űr kutatásában érdekelt egyetemek, intézetek és egyetemi hallgatók számára is.

IRODALOM

- <https://hu.wikipedia.org/wiki/Szputnyik%E2%80%93931>
- <https://en.wikipedia.org/wiki/CubeSat>
- <https://hu.wikipedia.org/wiki/M%C5%Bihold>
- R. S. Legge, P. Lozano, M. Martinez-Sanchez, Fabrication and Characterization of Porous Metal Emitters for Electro Spray Thrusters. In: The 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, 2007.
- R. S. Legge, P. C. Lozano, Electro Spray Propulsion Based on Emitters Microfabricated in Porous Metals. J. Propuls. and Power (2011) 27, 2.
- S. Dandavino, C. Ataman, C. N. Ryan, S. Chakraborty, D. Courtney, J. P. W. Stark, H. Shea, Microfabricated electro spray emitter arrays with integrated extractor and accelerator electrodes for the propulsion of small spacecraft. J. Micromech., Microeng. (2014) 24, 075011.
- <http://earthmistrynews.com.2017/03/24/dime-size-thrusters-could-propel-satellites-spacecraft/>
- <http://spectrum.ieee.org/tech-talk/aerospace/satellites/ion-electro-spray-engines-give-a-boost-to-tiny-satellites>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Taylor_cone
- P. Lozan, Efficiency estimation of EMI-PF4 ionic liquid electro spray thrusters, 4st AIAA/ASME/ASEE Joint propulsion Conference & Exhibit, Tucson, Arizona, 10–13 July, 2005.
- <https://www.interchopen.com/books/ionic-liquids-new-aspects-for-the-future/a-comparative-study-of-diperidinium-and-imidazolium-based-ionic-liquids-the...>
- <https://www.intechopen.com/books/ionic-liquids-new-aspects-for-the-future/safer-and-greener-catalysts-design-of-high-performance-biodegradable-and-low-toxicity-ionic-liquids>
- P. Walden, Molecular weights and electrical conductivity of several fused salts. Bul. Acad. Imper. Sci. (1914) 405.
- I. Newmington, J. M. Perez-Arlandis, T. Welton, Ionic Liquids as Designer Solvents for Nucleophilic Aromatic Substitutions., Org. Lett. (2007) 9, 5247.
- https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c9/Taylor_cone.jpg
- M. J. Earle, J. N. Esperanca, M. A. Gilea, J. N. Canongia-Lopes, L. P. Rebello, J. W. Magee, K. R. Seddon, J. A. Widegren, The distillation and volatility of ionic liquids. Nature (2006) 439, 831.
- M. Kosmulski, J. Gustafsson, J. P. Rosenholm, Thermal stability of low temperature ionic liquids revisited., Thermochim. Acta (2004) 412, 47.
- D. M. Fox, J. W. Gilman, A. B. Morgan, J. R. Shields, P. H. Maupin, R. E. Lyon, H. C. De Long, P. C. Trulove, Flammability and Thermal Analysis Characterization of Imidazolium-Based Ionic Liquids., Ind. Eng. Chem. Res. (2008) 47, 6327.
- M. Galinski, A. Lewandowski, I. Stepiak, Ionic liquids as electrolytes., Electrochim. Acta, (2006) 51, 5567.
- R. D. Rogers, K. R. Seddon, Chemistry. Ionic liquids – solvents of the future? Science (2003) 302, 792.
- T. W. Welton, Room-temperature ionic liquids. Solvents for synthesis and catalysis. Chem. Rev. (1999) 99, 2071.
- <http://www.nanosats.eu/index.html#figures>