7.6 A félvezetőiparban tisztításra használt perfluor-etán visszanyerése

Tárgyszavak: félvezetőgyártás; gáz; hulladék; membrántechnika; plazma; tisztítás; visszanyerés

Perfluorvegyületek alkalmazása az iparban

A rendkívül vékony félvezetőrétegeket kémiai gőzlecsapással (chemical vapour deposition – CVD) állítják elő. A művelet során a kamra falán megtapadó anyagokat időről-időre el kell távolítani. A tisztításhoz évek óta eredményesen alkalmazzák a perfluor szénvegyületeket, főleg a perfluor-etánt (C_2F_6), de a többi vegyülettel (pl. NF_3, CHF_3, SF_6) is jó eredményt értek el.

A rendkívül stabil perfluor szénvegyületek kedveltsége annak köszönhető, hogy semleges kémhatásúak, nem gyúlékonyak, felületi feszültségük kicsi és oldhatóságuk csekély. Előnyös tulajdonságaik miatt más területeken is alkalmazhatók, pl. tűzoltáshoz, a hűtőiparban hűtőközegként és szigetelőanyagként. Miután az ipar felfedezte, korlátozás nélkül gyártották, használták és engedték ki a szabadba ezeket az anyagokat. Később a környezetvédelmi szakemberek felfigyeltek a légkört károsító hatásukra. Rendkívüli stabilitásuk miatt a felsőbb légrétegekben lassan bomlanak el. A perfluor szénvegyületek üvegházhatása a széndioxidénak és metánénak többszöröse. A tudományos bizonyítékok alapján megindultak azok a kutatások, amelyek célja a környezetterhelés csökkentése volt.

A félvezetőiparban a CVD-kamra tisztításakor a perfluor-vegyületeket táplálnak be a kamrába, ahol plazma képződik. A vegyületek egy részéből disszociációval igen reakcióképes $C_2F_6^+$-gyök keletkezik, amely a kamra falán kivált anyaggal reakcióba lép. A tisztítási művelet befejezése után a perfluor vegyületet nitrogéngázzal hígítják, és a nitro-

gén/perfluor-etán tartalmú gázkeveréket folyamatosan távolítják el a rendszerből. A gázkeverék még reakcióképes vegyületeit gázmosóban közömbösítik. A gázmosóból a légkörbe kilépő gáz perfluor-koncentrációja 0,5–1,0 %(V/V).

A perfluor vegyületek és más üvegházhatású anyagok bomlási idejét az *1. táblázat* mutatja.

1. táblázat

A különböző gázok üvegházhatása a szén-dioxiddal összehasonlítva

Gáz	**Élettartam a légkörben (év)**	**Globális üvegház-potenciál (100 éves időtávban)**
CO_2	200	1
CF_4	50 000	6 330
C_2F_6	10 000	12 500
C_3F_6	–5 000	6 950
SF_6	3 200	24 900
NF_3	740	13 100
CHF_3	250	12 100

Az Egyesült Államok félvezetőipara és Környezetvédelmi Ügynöksége (Environmental Protection Agency, EPA) önkéntes egyezményt írt alá arról, hogy 2005-re az 1995-ös szint alá csökkentik a perfluor-vegyületek emisszióját. Az ipar több megoldást dolgozott ki a probléma kezelésére. Ezek között szerepelt a perfluor-etán helyettesítése NF_3-dal, illetve olyan könnyen illó perfluor-származékokkal, amelyek a CVD plazmakamrában elbomlanak. Más esetben olyan magas hőmérsékletű égető–gázmosó egységgel egészítették ki a rendszert, amely a perfluor-vegyületeket elbontja. A szakembereket foglalkoztatja a perfluor szénhidrogének újrahasznosításának gondolata is. Az újrahasznosítás gyakorlatból ismert és bevált módszere a gázkeverékek elválasztása membránnal. A perfluor-vegyületek igen nagy méretű molekulák, ezért az egyébként szokásos membránok nem alkalmasak a nitrogén/C_2F_6 gázkeverék szétválasztására.

Elválasztás membránokkal: elméleti alapok

A membránszeparációs technika a műanyagok egyik speciális tulajdonságán, a gázáteresztő képességen alapul. Az áteresztőképesség – P ($cm^3 \cdot cm/cm^2 \cdot sec \cdot Hgcm$) – a membrán vastagságától és a memb-

rán két oldalán uralkodó nyomáskülönbségtől függ. Az elválasztás hatásosságát a membrán szelektivitásával (α) jellemzik. A perfluor-etán nitrogéntől való elválasztására a szelektivitás a következőképpen adható meg:

$$\alpha = P_{N_2} / P_{C_2F_6}$$

A permeációs koefficiens (P) a diffúziós (D) és oldékonysági (S) koefficiens szorzataként is felírható:

$$\alpha = [D_{N_2} / D_{C_2F_6}] \text{ X } [S_{N_2} / S_{C_2F_6}]$$

Az egyenletben szereplő D koefficiens a gáz mozgékonyságát (mobilitását) fejezi ki, S, a Henry-féle szorpciós koefficiens a membrán gázkoncentrációját adja meg, amely viszont a gáz parciális nyomásától függ.

A $S_{N_2} / S_{C_2F_6}$ hányadossal jellemezhető a membrán oldhatósági szelektivitása, amely a szóban forgó gázok relatív kondenzálhatóságától függ. A membrán szelektivitása nitrogén/perfluor-etán gázkeverék esetében mindig kisebb egynél, mivel a perfluor-etán forráspontja –78 °C, a nitrogéné –196 °C.

A $D_{N_2} / D_{C_2F_6}$ mobilitási szelektivitás az elválasztandó gázmolekulák méretétől függ. A nitrogénmolekula méretét jelentősen meghaladó perfluor-etán-molekula mozgékonysága nagyságrendekkel elmarad a nitrogénétől, ebből következően a mobilitási szelektivitás mindig egynél nagyobb szám.

Az elmondottak alapján egy membrán szelektivitása attól függ, hogy az áteresztőképességet meghatározó mobilitásnak vagy oldhatóságnak jut-e nagyobb szerep. Szerves illó vegyületből (volatile organic compound – VOC) és levegőből álló keverék elválasztására jól bevált anyag a szilikongumi (poli-dimetil-sziloxán) membrán, mivel a VOC általában kondenzálható, továbbá a membránnak nagy a szorpciós kapacitása. A membránszeparációs technika további előnye, hogy a membrán a VOC/levegő keverékből a kisebb koncentrációjú komponenst engedi át, ami kis membránfelületen is elvégezhető. A perfluor-vegyületek permeációja szilikongumi membránon rendkívül lassú folyamat a nagy molekulaméret és a csekély oldhatóság miatt. A *2. táblázatban* néhány perfluor vegyületből és az azonos szénatomszámú paraffinból álló nitrogéntartalmú gázkeverék permeabilitása és szelektivitása szerepel 35 μm vastag szilikongumi membránon.

A táblázatban látható, hogy a perfluorvegyületekre jóval kisebb szelektivitás adódott azonos szénatomszám mellett, mint a paraffinokra.

Gazdaságosan működő rendszer olyan membránnal valósítható meg, amelynek nagy a nitrogénéteresztő képessége, így a minimálisra

csökkenthető a membránfelület, és ezzel a költségek. Az itt ismertetésre kerülő kutatásokban olyan membránok álltak az érdeklődés középpontjában, amelyeknek nagy a nitrogénáteresztő képessége és közepes a nitrogén/perfluor-etán szelektivitása.

2. táblázat

Szilikongumi membrán permeabilitása
és szelektivitása perfluor-karbon/nitrogén és paraffin/nitrogén elegyekre

Szénhidrogének			**Pefluorvegyületek**		
Gáz	**Áteresző képesség (Barrer)**	**Gáz/N szelektivitás**	**Gáz**	**Áteresző képesség (Barrer)**	**Gáz/N szelektivitás**
Nitrogén	400	1	Nitrogén	400	1
CH_4	1200	3,0	CF_4	200	0,5
C_2H_6	3200	8,3	C_2F_6	190	0,5
C_3H_8	4100	10,3	C_3F_8	280	0,7

nyomás 50 psia, hőmérséklet 23 °C;
1 psi = 6,88 x 10^6 Pa;
1 Barrer = $1x10^{-10}cm^3 \cdot cm/cm^2 \cdot sec \cdot Hgcm$ (normál állapotú gázra számítva).

Vizsgálati eredmények

A membrán anyagának vizsgálata

A vizsgálatokat amorf (üveges) polimerekkel folytatták. Az első mérésekhez olyan műanyagokat választottak, amelyeket általában az oxigén/nitrogén gázkeverékek elválasztásakor alkalmaznak. A nitrogén/perfluor-etán keverékre 100-500 közötti szelektivitást kaptak, de a normál állapotú nitrogén mindössze 1–2 x 10^{-6} cm^3/cm^2 mp Hgcm térfogatárammal haladt át a membránon. A következő feladat olyan membránok kidolgozása volt, amelyeknél a jó szelektivitás gyakorlati szempontból elfogadható nitrogén térfogatárammal párosult. Ehhez nyolc olyan amorf (üveges) műanyagot választottak, amelyeket a későbbi membránkombinációknál is fel lehetett használni.

- Teflon AF 2400 (Du Pont), üvegesedési hőmérséklet: 240 °C,
- Poli-fenilén-oxid (PPO), üvegesedési hőmérséklet: 220 °C,
- Etilcellulóz (EC), üvegesedési hőmérséklet: 50 °C,
- Poliimid 6FDA-TMPD, üvegesedési hőmérséklet: 370 °C,
- Poli-4-metil-2-pentén (PMP), üvegesedési hőmérséklet: >250 °C (a polimer 250 °C-on bomlik),

– Poliimid 6FDA-ODA, üvegesedési hőmérséklet: 300 °C,
– Hyflon AD 60, üvegesedési hőmérséklet: 121 °C,
– Poli-1-fenil-1-propén (PPP), üvegesedési hőmérséklet: >250 °C (a polimer 250 °C-on bomlik),

Valamennyi műanyagra nagy nitrogénáteresztő képesség volt jellemző, és az üveges átmenet széles hőmérséklet-tartományt ölelt fel. A membránok szelektivitását a nitrogén és perfluor-etán relatív diffúziós koefficienseinek összehasonlítása alapján ellenőrizték. A magasabb üvegesedési hőmérséklettel rendelkező műanyagok szelektivitása jobb, mint az alacsonyabb hőmérsékletűeké, bár kisebb áteresztőképesség mellett.

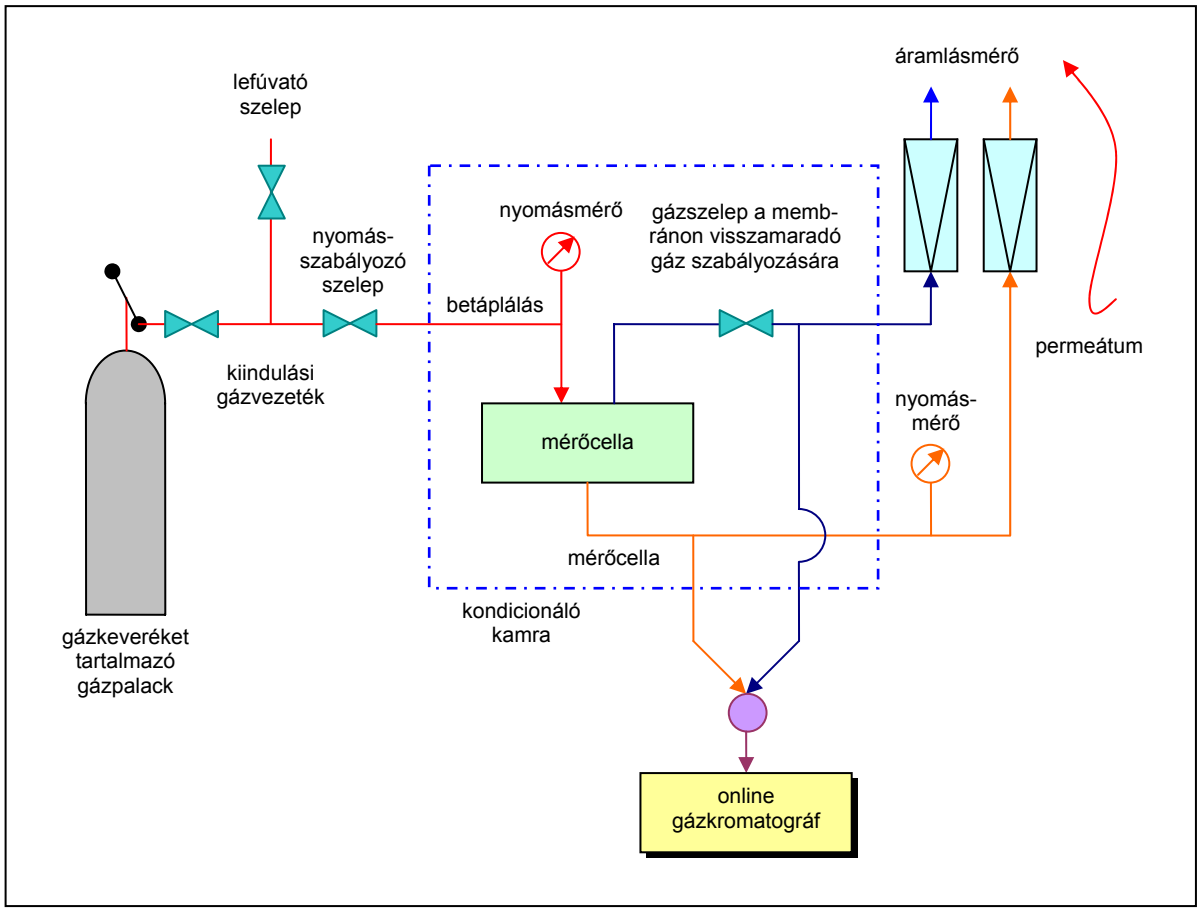
A nyolcféle műanyagból kisebb mintamennyiséget állítottak elő kísérletképpen. A kombinált membrán mikroporózus hordozórétegből állt, amelyet azután műanyaggal vontak be. A membránok áteresztőképességét az *1. ábrán* látható mérőberendezés segítségével határozták meg. A membránokból a mérőcellával azonos méretű mintát vágtak ki. A nitrogénből és pefluor-etánból előzetesen megadott összetételű keveréket állítottak elő, amelyet gázpalackba töltve tároltak. A mérőcellában a gázkeverék betáplálási sebessége és a membránon áthaladó gáz áramlási sebessége közel azonos volt. A mérés alatt gázkromatográfiás módszerrel ellenőrizték a betáplált gázkeverék, a membránon áthaladó és a visszszamaradó gáz összetételét. A mérési eredményeket a *3. táblázat* foglalja össze.

3. táblázat

A nitrogén/perfluor-etán gázkeverék alkotóinak szétválasztása műanyag membránon

Műanyag típusa	**Térfogatáram (normál állapotra és egységnyi felületre számítva), 10^{-6} cm^3/cm^2 · sec · Hgcm**		**Szelektivitás**
	Nitrogén	**Perfluor-etán**	**N_2/C_2F_6**
Teflon AP 2400	240	11	21
PMP	50	1,2	40
EC	30	0,20	150
Hyflon AD 60	19	0,024	800
Poliimid (6FDA-TMPD)	8,5	0,057	150
PPP	5,1	0,11	47
PPO	4,4	0,007	590
Poliimid (6FDA-ODA)	2,2	0,012	170

Gázkeverék 2 %(V/V) C_2F_6-tartalmú nitrogén, betáplálási nyomás 200 psig, membránon átáramló gáz nyomása: 0 psig, hőmérséklete 25 °C.
1 psi = 6,88 x 10^3 Pa.



1. ábra A gázáteresztő képességet mérő berendezés vázlata

A mérési eredmények is igazolták azt a korábbi megfigyelést, amely szerint a nagyobb térfogatáram gyengébb szelektivitással jár. A további vizsgálatokhoz az előzetes kísérletek alapján a következő három membránt választották ki: EC, PMP és Hyflon AD 60. Az EC nitrogénáteresztő képessége megfelelő volt, amihez közepes szelektivitás társult. A Hyflon AD 60 szelektivitása a többi mintával összehasonlítva feltűnően jó volt, ami azért meglepő, mert üvegesedési hőmérséklete a többi membránéhoz képest kifejezetten alacsony (124 °C). A Hyflon AD 60 perfluorozott műanyag. A nagy nitrogén/perfluor-etán szelektivitás valószínűleg azzal függ össze, hogy a perfluor-etán gáz nem oldódik benne.

A perfluor-etán-koncentráció és a hőmérséklet hatása

A következő lépésben a három műanyagból nagyüzemi technológiával több fóliatekercset gyártottak, amelyekből nagyüzemi bevonó eljá-

rással membránt állítottak elő. A membránok gázáteresztő képességét különböző nitrogén/perfluor-etán összetételű gázkeverékekkel ellenőrizték. A mérési eredményekből az derült ki, hogy a membránon áthaladó nitrogén térfogatárama gyakorlatilag független a keverék perfluor-etán-koncentrációjától, ugyanakkor mindkét gáz koncentrációjának növelése csökkentette a membránon áthaladó gáz térfogatáramát.

A hőmérséklet emelkedésével a várakozásnak megfelelően nőtt az áramlási sebesség, aminek az a fizikai magyarázata, hogy a diffúziós koefficiens jobban nőtt, mint ahogyan a szorpciós koefficiens csökkent. Nitrogén esetében a növekedés valamivel kifejezettebb volt a kondenzálható perfluor-etánénál, ennek megfelelően a membrán szelektivitása a 0 °C-on mért 110-ről 140-re nőtt 50 °C-on.

A membránmodulok teljesítménye

Az EC és a Hyflon összetett anyagú membránokból spirál alakú szűrőket készítettek. A nitrogén térfogatárama a várakozásnak megfelelően alakult, de a szelektivitás romlott, ami részben a rendszer tömítetlenségére, részben anyaghibára vezethető vissza. A későbbiekben mindkét problémát sikerült kiküszöbölni.

A spirál alakú szűrőmembrán-elemeknél számolni kell az ún. csatornahatással, ami azt jelenti, hogy a gáz egy része úgy halad át a membránon, hogy közben nem érintkezik azzal. Tapasztalatok szerint ez elsősorban a szűrőmembránt körülvevő köpenyvégekre jellemző. Becslések szerint a membránon változatlanul áthaladó gáz mennyisége a teljes gázmennyiség 1–2 %(V/V)-át teszi ki. Tekintettel arra, hogy a betáplált gáz 10–20 %(V/V)-a halad át a membránon, a visszamaradó gázzal keveredő csekély mennyiségű kiindulási gázkeverék nem befolyásolja számottevően a membrán teljesítményét.

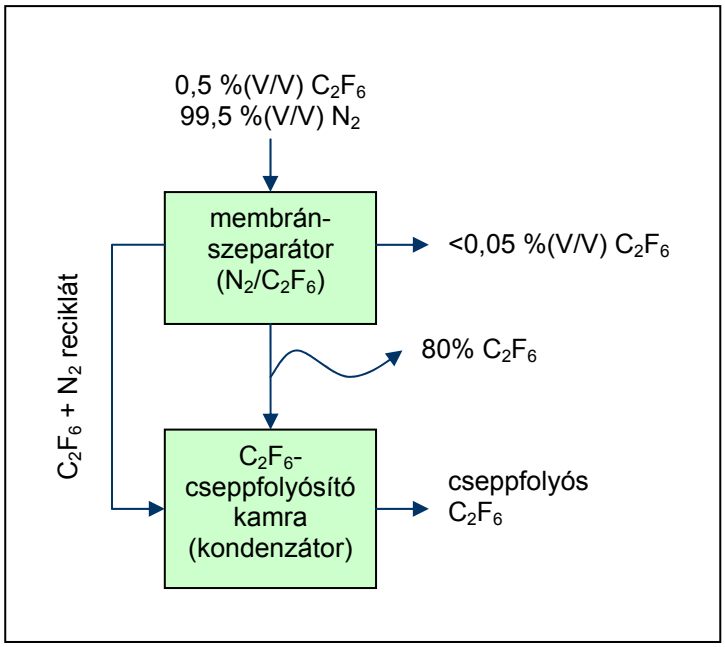
A nitrogén/perfluor-etán gázkeverékre kifejlesztett membránok viszont 90%-os hatásfokkal dolgoznak. A szokatlanul jó nitrogénkihozatalnak az az oka, hogy a kiindulási gáz 99,5 %(V/V)-ban nitrogénből áll. A nitrogénszelektív membránon gyakorlatilag a teljes gázmennyiségnek át kell haladnia ahhoz, hogy a visszamaradó gáz perfluor-etánban feldúsuljon. A kísérletben a spirál alakú membránon átáramló gáz 90 %(V/V)-ban nitrogént tartalmazott, két szűrőegység sorba kapcsolásával 99 %(V/V)-os nitrogénkoncentrációt, három egység sorba kapcsolásával pedig már 99,9 %(V/V)-ot sikerült elérni.

Az előzetes kísérletekben legjobb eredményt adó Hyflon és EC membránokból spirál alakú szűrőegységeket készítettek. A két hibamentes Hyflon- és egy EC-egység összehasonlításakor a nitrogén térfogat-

árama mindkét típusnál 20–25 x 10^{-6} $cm^3/cm^2 \cdot sec \cdot Hgcm$ volt. Ezek az értékek megközelítették a mérőcellával végzett mérések eredményét. A szelektivitás tekintetében viszont jelentős eltérést tapasztaltak, éspedig Hyflon esetében 75 helyett 57, EC esetében pedig 80 helyett 41 értéket kaptak. A különbség feltehetően membránhibából adódhatott, aminek következtében zavar állt be a gázáramlásban. Ez az igen nagy szelektivitású membránoknál jelentősen lecsökkentette a szelektivitást, ami még tovább romolhat az előbb említett csatornahatás következtében. A további kísérletekben már csak a legjobb eredményt adó Hyflon AD 60 membránt vizsgálták.

A rendszer kialakítása

A *2. ábrán* látható annak az elválasztási műveletnek a vázlata, amelyben a CVD-kamrák tisztításából származó gázokból vissza lehet nyerni a perfluor-etánt. A gázkeverék kiindulási koncentrációja 0,5 %(V/V) perfluor-etán volt. A rendszer lényegében a nitrogén/perfluor-etán keveréket elválasztó membránból és a perfluor-etán-kondenzátorból állt. A membránról távozó gázt közvetlenül a szabadba engedik, a visszamaradó gáz perfluor-etánban feldúsul. A rendkívül illó perfluor-etán cseppfolyósításához legalább 80 %(V/V) koncentrációt kell elérni ahhoz, hogy a művelet gazdaságos legyen.



2. ábra A membránszűrő elvi vázlata

A tervezés kiindulási alapadata az volt, hogy a tisztításakor kapott gázkeverék perfluor-etán-koncentrációja 0,5 %(V/V). A számításokhoz ChemCad 5.0 (ChemStations, Houston, TX) szimulációs programot használták, amelyet a membránszeparátor adataival egészítettek ki. A számítást az alábbi négy változatra végezték el:

– egyfokozatú,
– kétlépcsős,
– kétfokozatú,
– kétlépcsős/kétfokozatú berendezés *(3. ábra)*.

A számításnál a következő adatokból indultak ki:

– a membránon áthaladó nitrogén áramlási sebessége: 50×10^{-6} $cm^3/cm^2 \cdot sec \cdot Hgcm$,
– a membrán szelektivitása: 50,
– a membránra érkező gáz nyomása: 250 psig.

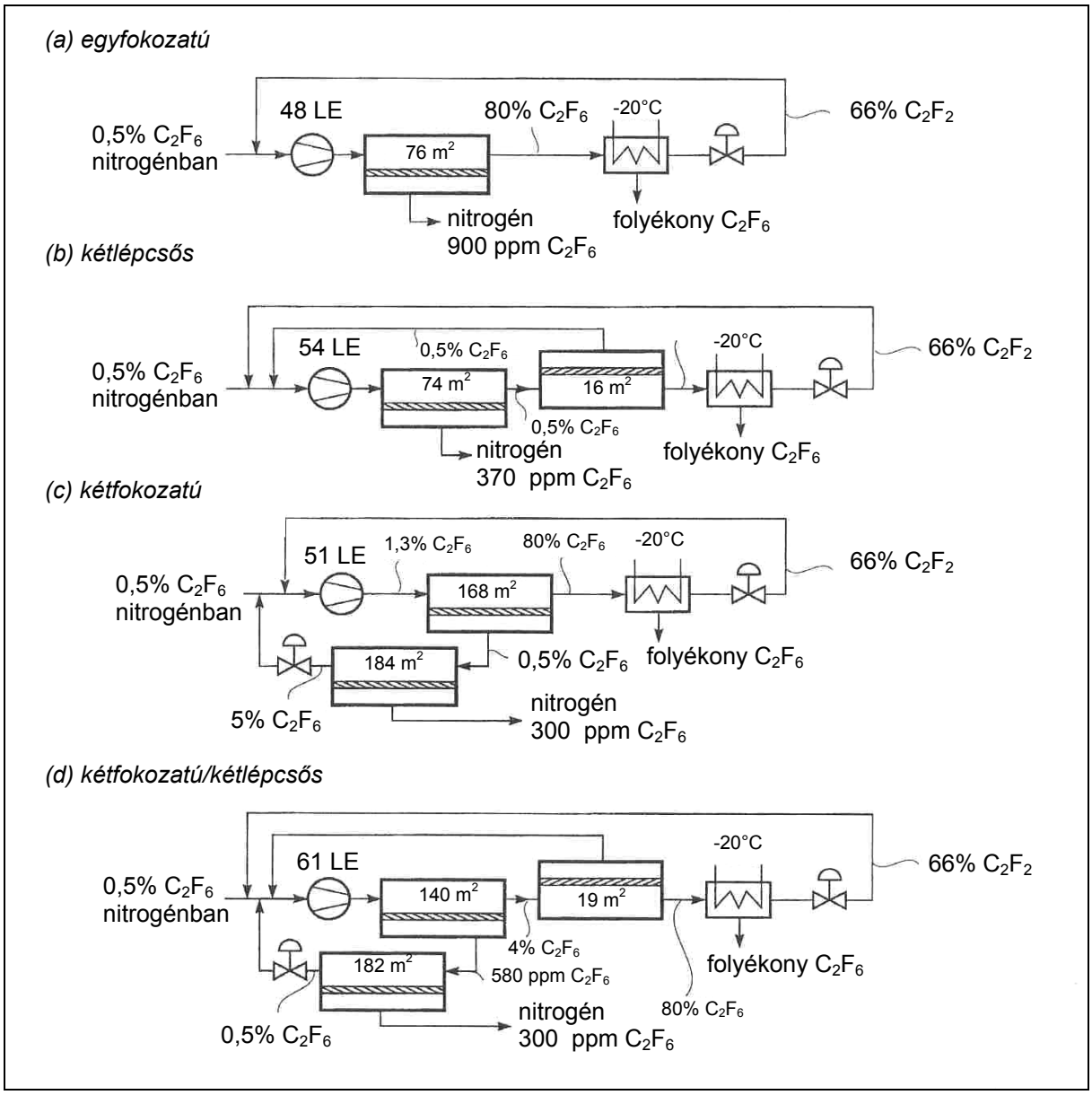
Mind a négy változatra megadták a kompresszorteljesítményt és a membránfelület nagyságát. A membránszűrő alkalmazásakor fontos a gazdaságosság, ezért a maximális biztonság mellett az üzemeltetési költség minimalizálására törekedtek. Az egyes változatok kidolgozásakor több lehetőség közül az egyszerűbb kezelést és a biztonságosabb megoldást választották, pl. egy kompresszort terveztek. A perfluor-etán kb. fele kondenzálható –20 °C-on, a maradékot visszavezetik a rendszerbe. Alacsonyabb hőmérsékleten dolgozó kondenzátorral csökkenthető a membrán felülete, de akkor nagyobb üzemeltetési költséggel kell számolni.

Egyfokozatú berendezés

Az egy membránnal dolgozó rendszerrel 70 %(V/V)-ra növelhető a perfluor-etán koncentrációja, amely –20 °C-on kondenzálható. A nem kondenzálódó gázt visszavezették a kompresszorhoz, ahol a kezelendő gázhoz keverték. A tapasztalat azt mutatta, hogy a permeátumban a perfluor-etán koncentrációja néhány ppm-re csökkent, azaz gyakorlatilag sikerült a két gáz elválasztása. A membrán másik oldalán viszont úgy betöményedett a perfluor-etán, hogy a két oldal között kialakult rendkívül nagy koncentrációkülönbség következtében átszivárgott a tiszta nitrogénbe. Így, bár a berendezés kezelése egyszerű, jól áttekinthető és ellenőrizhető, csak 81%-os hatásfok érhető el vele.

Kétlépcsős berendezés

A két sorba kapcsolt membrán első lépcsője után a keverék perfluor-etán koncentrációja 0,5-ről 5 %(V/V)-ra nőtt, a permeátum 370 ppm



3. ábra A négy rendszerelrendezés vázlata.
Mind a négyben azonos nitrogénszelektivitású membránt alkalmaznak (betáplálás: 99,5% (N_2/ 0,5% C_2F_2); kompresszornyomás: 250 psig; kondenzátor-hőmérséklet: –20 °C; nitrogén térfogatárama normál nyomáson: $50x10^{-6}$ $cm^3/cm^2 \cdot sec \cdot Hgcm$; N_2/C_2F_2-szelektivitás: 50, kompresszor hatásfoka: 67%)

perfluor-etánt tartalmazott. A második lépcsőben a gáz koncentrációja 5-ről már 80 %(V/V)-ra nőtt, ugyanakkor a permeátumban a perfluor-etán koncentrációja 370 ppm-ről 0,5 %(V/V)-ra nőtt. A második lépcsőben ka-

pott permeátumot visszavezették a kompresszorhoz. A recirkuláció miatt az egyfokozatú berendezésnél nagyobb teljesítményű kompresszorra volt szükség, és a membránfelületet is meg kellett növelni, a hatásfok viszont 93%-ra emelkedett.

Kétfokozatú berendezés

Ebben az elrendezésben az első membránból kikerülő permeátumot a nitrogén eltávolítására használják, aminek eredményeként 80% perfluor-etánt tartalmazó gázáram keletkezett, amely kondenzálható és eltávolítható. A permeátumban a szivárgás miatt megnőtt a perfluor-etán koncentrációja, ezért a gáz további tisztítása vált szükségessé, amit a második fokozatban végeztek el. A második fokozatban célszerű a belépő gáz nyomását úgy megválasztani, hogy a rendszer egy kompresszorral működtethető legyen. A modellszámítás szerint az optimális nyomásérték 100 psig (1 psi = 6,88 x 10^3 Pa).

Ebben a változatban a koncentrációviszonyok a következőképpen alakultak: az első lépcsőben a perfluor-etán koncentrációja elérte a 80 %(V/V)-ot, a permeátumé 5000 ppm volt. A második lépcsőben a permeátum perfluor-etán tartalma 5000 ppm-ről 300 ppm-re csökkent, az 5 %(V/V) perfluor-etán-tartalmú maradékot a kompresszorhoz vezették vissza.

A négy változat közül ez a megoldás tűnt a legkevésbé gazdaságosnak. A nyomásesés miatt jelentősen meg kellett növelni a membránfelületet, ill. a permeátumot kétszer kellett kezelni. A tisztított nitrogén perfluor-etán-koncentrációja alig valamivel kisebb, mint a kétlépcsős kezelés után.

Kétlépcsős/kétfokozatú berendezés

A berendezés a kétlépcsős és kétfokozatú elrendezés kombinációja. Ez adta a legjobb minőségű permeátumot: mindössze 32 ppm volt a perfluor-etán-tartalom, ami 99,3%-os hatásfoknak felel meg. A kiugróan jó eredmény elsősorban annak köszönhető, hogy a kétlépcsős egységről érkező gázkeverékben mindössze 580 ppm volt a perfluor-etán koncentrációja, az egyszerű kétfokozatú berendezés 5000 ppm koncentrációjával szemben. A második fokozatban egy 0,5 %(V/V) perfluor-etán-tartalmú frakciót és minimális szennyezést tartalmazó nitrogént kaptak. Az előbbit visszavezették a rendszerbe, a 32 ppm perfluor-etán-tartalmú nitrogént a szabadba engedték.

A négy módszer összehasonlító értékelése

A négyféle változat főbb jellemzőit a *4. táblázat* foglalja össze.

4. táblázat

A különböző berendezések főbb jellemzői

Berendezés típusa	**Kompresszor teljesítmény (LE)**	**Szűrőfelület (m^2)**	**A távozó nitrogén perfluor-etán-koncentrációja (ppm)**
Egyfokozatú	46	76	900
Kétlépcsős	54	90	370
1		74	
2		16	
Kétfokozatú	51	352	300
1		184	
2		168	
Kétlépcsős/kétfokozatú	61	341	32
1		182	
2		140	
3		19	

Membrán típusa: Hyflon AD 60
Betáplált gáz összetétele: 99,5 %(V/V) N_2/C_2F_2
Belépő gáznyomás: 250 psig (1 psi = 6,88 x 10^3 Pa)
Kondenzátor hőmérséklete: –20 °C
Nitrogén térfogatárama: 50 x 10^{-6} cm^3/cm^2 mp Hgcm (normál állapotú gázra számítva)
A membrán N_2/C_2F_6 szelektivitása: 50
Kompresszor hatásfoka: 67 %

A négyféle elrendezést gazdaságossági szempontból is összehasonlították, és ebből a szempontból a kétlépcsős/kétfokozatú megoldás tűnik a legjobbnak. Ebben folyamatos üzemmenetben évente több mint 45 360 kg perfluor-etán állítható elő, a maximális hozam 99,9%. A kétlépcsős elrendezéssel 99%-os kihozatal érhető el. A perfluor-etán ára 66 USD/kg. Feltéve, hogy a regenerált perfluor-etán ára ennek csak egyharmada, 22 USD/kg, akkor ez évente 1 M USD hasznot hoz. A kétlépcsős berendezés beruházási költsége kb. 400 000 USD, vagyis egy évnél rövidebb megtérüléssel lehet számolni (3. ábra).

A félvezetőipar a membránszeparációs eljárás mellett más megoldást is keres az emissziócsökkentéshez. Ezek között érdemes megemlíteni a perfluor-etán helyettesítését a CVD-kamrában elbomló NF_3-al, amelynél nincs emisszió, így elképzelhető, hogy a jövőben csökkenni fog a membránszeparációs eljárás iránti érdeklődés.

Összeállította: Haidekker Borbála

Wijmans, J. G.; He, Z. stb.: Recovery of perfluoroethane from chemical vapor deposition operations in the semiconductor industry. = Separation and Purification Technology, 35. k. 3. sz. 2004. p. 203–213.

Jaekyung, Y.; Yeomin, Y.: Use of surfactant modified ultrafiltration for perchlorate removal. = Water Research, 37. k. 9. sz. 2003. p. 2001–2012.