

$\vec{i}, \vec{j}$  za koordinatne vektore, tada za svaki vektor  $\vec{a}$  postoji jedan jedini par realnih brojeva  $\alpha_x, \alpha_y$  takvih da je  $\vec{a} = \alpha_x \vec{i} + \alpha_y \vec{j}$ . Ti se brojevi zovu koordinate vektora  $\vec{a}$  i piše se  $\vec{a} = [\alpha_x, \alpha_y]$ . Za bilo koje vektore  $\vec{a} = [\alpha_x, \alpha_y]$ ,  $\vec{b} = [\beta_x, \beta_y]$  i bilo koji realan broj  $\lambda$  vrijedi  $-\vec{a} = [-\alpha_x, -\alpha_y]$ ,  $\vec{a} + \vec{b} = [\alpha_x + \beta_x, \alpha_y + \beta_y]$ ,  $\lambda \vec{a} = [\lambda \alpha_x, \lambda \alpha_y]$ , a osim toga je  $\vec{0} = [0, 0]$ . Ako su koordinatni vektori  $\vec{i}, \vec{j}$  jedinični i međusobno okomiti, tada je  $\vec{a} \cdot \vec{b} = \alpha_x \beta_x + \alpha_y \beta_y$ .

**Višedimenzionalna euklidska geometrija.** Neka je  $n$  bilo koji prirodan broj. Točkom  $n$ -dimenzionalnog euklidskog prostora  $E^n$  smatra se uređena  $n$ -torka realnih brojeva  $x_1, \dots, x_n$ , koji se zovu koordinatama te točke. Ako su  $x_1, \dots, x_n$  koordinate točke  $X$ , tada se piše  $X = (x_1, \dots, x_n)$ . Uređeni par točaka prostora  $E^n$  zove se orijentirana dužina. Prva točka para je početak, a druga kraj te orijentirane dužine. Orijetirana dužina s početkom  $A$  i krajem  $B$  označava se sa  $\overrightarrow{AB}$ . Neka je  $A = (a_1, \dots, a_n)$ ,  $B = (b_1, \dots, b_n)$ ,  $C = (c_1, \dots, c_n)$ ,  $D = (d_1, \dots, d_n)$ . Kaže se da su orijentirane dužine  $\overrightarrow{AB}, \overrightarrow{CD}$  ekvivalentne i piše se  $\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{CD}$ , ako je  $b_1 - a_1 = d_1 - c_1, \dots, b_n - a_n = d_n - c_n$ . Skup svih orijentiranih dužina raspada se u klase međusobno ekvivalentnih orijentiranih dužina. Te klase zovu se vektori i označavaju se sa  $\vec{a}, \vec{b}, \dots$ . Ako je  $\overrightarrow{AB}$  predstavnik vektora  $\vec{c}$  i ako je  $A = (a_1, \dots, a_n)$ ,  $B = (b_1, \dots, b_n)$ , tada se brojevi  $c_1 = b_1 - a_1, \dots, c_n = b_n - a_n$  zovu koordinate vektora  $\vec{c}$  i piše se  $\vec{c} = [c_1, \dots, c_n]$ . Vektor  $[0, \dots, 0]$  zove se nulvektor i označava se sa  $\vec{0}$ . Ako je  $\vec{a} = [a_1, \dots, a_n]$  bilo koji vektor, tada se vektor  $[-a_1, \dots, -a_n]$  zove suprotni vektor vektora  $\vec{a}$  i označava sa  $-\vec{a}$ . Očito je  $-(-\vec{a}) = \vec{a}$ . Vektor  $[a_1, \dots, a_n]$  zove se radijvektor točke  $A = (a_1, \dots, a_n)$  i označava se sa  $\vec{r}_A$ .

Zbroj dvaju vektora, produkt realnog broja i vektora te skalarni produkt dvaju vektora definiraju se formulama  $[a_1, \dots, a_n] + [b_1, \dots, b_n] = [a_1 + b_1, \dots, a_n + b_n]$ ,  $k[a_1, \dots, a_n] = [ka_1, \dots, ka_n]$ ,  $[a_1, \dots, a_n] \cdot [b_1, \dots, b_n] = a_1 b_1 + \dots + a_n b_n$ . Te tri operacije imaju ista svojstva kao i operacije s vektorima u vektorskoj algebri euklidskog prostora. Duljinom vektora  $\vec{a} = [a_1, \dots, a_n]$  zove se broj  $|\vec{a}| = \sqrt{a^2} = \sqrt{a_1^2 + \dots + a_n^2}$ . Za vektore  $\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_m$  kaže se da su linearno zavisni, ako postoje realni brojevi  $k_1, \dots, k_m$ , od kojih je bar jedan različit od nule, takvi da vrijedi  $k_1 \vec{a}_1 + \dots + k_m \vec{a}_m = \vec{0}$ . Za vektore, koji nisu linearno zavisni, kaže se da su linearno nezavisni. Skup linearno nezavisnih vektora može imati najviše  $n$  elemenata. Ako su  $\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_m, \vec{b}$  linearno zavisni vektori, a vektori  $\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_m$  linearno nezavisni, tada postoji jedna jedina  $n$ -torka realnih brojeva  $k_1, \dots, k_m$  takvih da je  $\vec{b} = k_1 \vec{a}_1 + \dots + k_m \vec{a}_m$ , tj. vektor  $\vec{b}$  može se na jedan jedini način predočiti kao linearna kombinacija vektora  $\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_m$ .

Udaljenošću točaka  $A = (a_1, \dots, a_n)$ ,  $B = (b_1, \dots, b_n)$  zove se broj  $d(A, B) = |\overrightarrow{AB}| = \sqrt{(b_1 - a_1)^2 + \dots + (b_n - a_n)^2}$ . Ako su  $\vec{a}, \vec{b}$  bilo koji vektori, tada vrijedi  $\vec{a} \cdot \vec{b} \leq |\vec{a}| |\vec{b}|$ . Kut  $\sphericalangle(\vec{a}, \vec{b})$  vektora  $\vec{a} = [a_1, \dots, a_n]$ ,  $\vec{b} = [b_1, \dots, b_n]$  definira se formulom 
$$\cos \sphericalangle(\vec{a}, \vec{b}) = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|} = \frac{a_1 b_1 + \dots + a_n b_n}{\sqrt{a_1^2 + \dots + a_n^2} \sqrt{b_1^2 + \dots + b_n^2}}. \quad (1)$$

**Izometrija prostora  $E^n$**  jest obostrano jednoznačno preslikavanje skupa  $E^n$  na sebe, koje čuva udaljenost, tj. ako je  $f$  izometrija i  $A, B$  bilo koje točke, tada je  $d(f(A), f(B)) = d(A, B)$ . Skup svih izometrija prostora  $E^n$  tvori jednu grupu transformacija, tzv. grupu izometrija prostora  $E^n$ . Za dva skupa točaka  $F, F'$  prostora  $E^n$  kaže se da su *sukladni* ako postoji izometrija  $f$  takva da je  $f(F) = F'$ .

**Pravcem**, određenim točkom  $T_0$  i vektorom  $\vec{a}$ , naziva se skup svih točaka  $T$  takvih da vrijedi  $\vec{r}_T = \vec{r}_{T_0} + t\vec{a}$ , gdje je  $t$  bilo koji realan broj. Općenitije, *m-dimenzionalnom ravninom* ili kraće *m-ravninom* ( $1 \leq m \leq n$ ), određenom točkom  $T_0$  i linearno nezavisnim vektorima  $\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_m$ , naziva se skup svih točaka  $T$  takvih da vrijedi  $\vec{r}_T = \vec{r}_{T_0} + t_1 \vec{a}_1 + \dots + t_m \vec{a}_m$ , gdje su  $t_1, \dots, t_m$  bilo koji realni brojevi. Može se dokazati da je svaka *m-ravnina* jedan

*m-dimenzionalni euklidski prostor*. Kroz svake dvije različite točke  $T_0, T_1$  prolazi jedan jedini pravac, tako da su njegove točke  $T$  dane sa  $\vec{r}_T = \vec{r}_{T_0} + t \overrightarrow{T_0 T_1}$ . Općenitije, kroz svakih  $m + 1$  točaka  $T_0, T_1, \dots, T_m$ , koje ne pripadaju jednoj  $(m - 1)$ -ravnini, prolazi jedna jedina *m-ravnina*, tako da su njezine točke  $T$  dane sa  $\vec{r}_T = \vec{r}_{T_0} + t_1 \overrightarrow{T_0 T_1} + \dots + t_m \overrightarrow{T_0 T_m}$ . Prazan skup smatra se  $(-1)$ -ravninom, a skup, koji sadrži samo jednu točku, smatra se  $0$ -ravninom, dok se  $(n - 1)$ -ravnina zove još i *hiper-ravnina*. Ako su  $\vec{a}_{m+1}, \dots, \vec{a}_n$  linearno nezavisni vektori, a  $k_{m+1}, \dots, k_n$  realni brojevi, tada je skup svih točaka  $T$ , takvih da vrijedi  $\vec{a}_{m+1} \cdot \vec{r}_T + k_{m+1} = 0, \dots, \vec{a}_n \cdot \vec{r}_T + k_n = 0$ , jedna *m-ravnina*. Zajedničke točke jedne *p-ravnine* i jedne *q-ravnine* tvore jednu *r-ravninu*, gdje je  $r \geq -1, r \leq p, r \leq q$ . Ako je  $s$  najmanji broj, takav da neka *s-ravnina* sadrži promatranu *p-ravninu* i promatranu *q-ravninu*, tada vrijedi  $p + q = r + s$ .

**Hipersferom**, odnosno **hiperkuglom** s središtem  $O$  i polumjerom  $r$  naziva se skup svih točaka  $T$  takvih da je  $d(O, T) = r$ , odnosno  $d(O, T) \leq r$ . Obujam  $V$  hiperkugle polumjera  $r$  jest za parno  $n$

$$V = \frac{\sqrt{2^n \pi^n}}{2 \cdot 4 \dots (n-2) \cdot n} r^n,$$

odnosno za neparno  $n$

$$V = \frac{\sqrt{2^{n+1} \pi^{n+1}}}{1 \cdot 3 \dots (n-2) \cdot n} r^n, \quad (2)$$

a ako je  $O$  oplošje pripadne hipersfere, tada vrijedi

$$V = \frac{Or}{n}.$$

LIT.: F. Klein, Vergleichende Betrachtungen über neuere geometrische Forschungen, Erlangen 1872. — P. H. Schoute, Mehrdimensionale Geometrie, Göschen, Leipzig 1902. — H. B. Eђиллов, Высшая геометрия, Гос. изд. техн.-теор. лит., Москва 1945. — B. И. Косини, Основания геометрия, Учпедгиз, Москва 1946. — T. P. Andelici, Teorija vektora, Naučna knjiga, Beograd 1949. — Euklidovi elementi I-XIII, prevod A. Bilimović, SAN i Naučna knjiga, Beograd 1949—1957. — W. Lietzmann, Anschauliche Einführung in die mehrdimensionale Geometrie, Oldenbourg, München 1952. — G. B. Robinson, The foundations of geometry, Univ. of Toronto Press, Toronto 1952. — B. Kerékjártó, Les fondaments de la géométrie I, Akadémiai Kiadó, Budapest 1955. — D. Hilbert, Osnovi geometrije (prijevod: SAN, Beograd 1957). — D. M. Ivanović, Vektorska analiza, Naučna knjiga, Beograd 1960. — M. Radović, Elementarna geometrija, Naučna knjiga Beograd 1961. — H. S. M. Coxeter, Introduction to geometry, John Wiley & Sons, New York 1961. — Я. Л. Трапштин, Основания геометрии, Гос. учено-изд. издат., Москва 1961. — D. Blaniša, Viša matematika I-1, Tehnička knjiga, Zagreb 1963. — H. Meschkowski, Grundlagen der euklidischen Geometrie, Bibliographisches Institut, Mannheim 1966. — Энциклопедия элементарной математики V, Наука, Москва 1966. — H. Eves, A survey of geometry, Allan and Bacon, Boston 1970. — H. B. Eђиллов, Э. P. Ролевинорн, Линеиная алгебра и многомерная геометрия, Наука, Москва 1970. — S. Kurepa, Uvod u linearnu algebru, Školska knjiga, Zagreb 1975.

V. Volenc

**GERMANIJ** (Germanium, Ge, at. br. 32, at. masa 72,59), kemijski element, treći po redu u IVa (ugljikovoj) skupini periodskog sustava elemenata.

Postojanje germanija naslutio je već 1864. J. A. R. Newlands, a predskazao ga je već D. I. Mendeljejev 1870. U svojoj drugoj tablici periodskog sustava, koju je objavio 1871. Mendeljejev ga je nazvao ekasilicijem (prema sanskritskom *eka*, jedan, prvi), hitijuci (time podvuci njegovu srodnost sa silicijem). Mendeljejev je također predskazao i svojstva ekasilicija. Ime germanijem nadjenuto mu je, u čast Njemačke (Germanije), C. Winkler koji ga je prvi dobio 1886. Pokazalo se da se Mendeljejevljeva predskazivanja svojstava ekasilicija vrlo dobro podudaraju sa stvarno utvrđenim svojstvima germanija.

Germanij nije bio važan za tehniku sve do drugoga svjetskog rata, kad je postao zanimljiv kao poluvodič (v. *Elektronika, sastavni dijelovi*, TE4, str. 471; v. *Poluvodičiji*). Tada se s razvojem radarske tehnike pojavila potreba proizvodnje intrinzičnih poluvodiča s reproduktivnim svojstvima. Kad su uskoro iza toga nove metode rafinacije omogućile proizvodnju germanija u izvanredno čistom stanju, u kakvom se drugi poluvodičiji nisu mogli dobiti, germanij je ubrzo postao najvažnija i najtraženija tvar u proučavanju mehanizama vođenja električne struje poluvodičima i materijal za razvoj poluvodičke tehnike. Neko vrijeme germanij je bio vrlo važan materijal za proizvodnju ispravljača. U novije vrijeme silicijski ispravljači istisnuli su germanijske iz upotrebe u industriji. Ipak, germanij je i dalje ostao važan materijal u izradbi niza drugih proizvoda i za znanstvena istraživanja, pa njegova upotreba i dalje raste.

Kao i silicij, germanij se u prirodi nalazi isključivo vezan. Računa se da litosfera sadrži manje od  $10^{-8}\%$  germanija, ali su njegovi spojevi vrlo rašireni u prirodi. Nalaze se u skoro svim silikatima i sulfidnim rudama. Zbog takve raspršenosti, koncentracije spojeva germanija u Zemljinoj kori skoro su posvuda vrlo male, pa se germanij ipak smatra rijetkim elementom.

Za dobivanje germanija najvažniji minerali jesu germanit,  $\text{Cu}_3(\text{Fe}, \text{Ge})\text{S}_4$  i renierit  $(\text{Cu}, \text{Fe})_3(\text{Fe}, \text{Ge}, \text{Zn}, \text{Sn}) \cdot (\text{S}, \text{As})_4$ . Već prema količinskim odnosima u njima vezanih elemenata i koliko su onečišćeni drugim mineralima (obično mineralima bakra, olova, kositra, galija i arsena), germanit sadrži 5...10,2, a renierit 6,3...7,7% Ge. Najvažnije nalazište tih minerala je Tsumeb u Namibiji. Tu se dobiva bakrena ruda koja uz germanit i renierit sadrži još i halkozin, galenit i tenantit ili laganu Fahlerovu zemlju ( $2\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{As}_2\text{S}_3$ ). Renierit se nalazi i kod Kipushia u Zairu.

Drugi minerali germanija, npr. argirodit  $4\text{Ag}_2\text{S} \cdot \text{GeS}_2$  (nalazište u Saskoj) i kanfedit  $4\text{Ag}_2\text{S} \cdot (\text{Sn}, \text{Ge})\text{S}_2$ , manje su važni. Za dobivanje germanija važniji su njegovi spojevi koji se nalaze kao primjese sfalerita i nekih kamenih ugljena. Najčešće sfaleriti sadrže ~0,01%, ponekad čak do 1% Ge. Neki engleski i ruski ugljeni sadrže 0,001...0,01% Ge.

### ELEMENT GERMANIJ

Prirodni germanij smjesa je od pet postojećih izotopa (tabl. 1). Osim toga, poznato je još 16 radioaktivnih izotopa germanija (u nizu  $^{64}\text{Ge}$ ... $^{69}\text{Ge}$ ,  $^{71}\text{Ge}$ ... $^{75}\text{Ge}$  i u nizu  $^{77}\text{Ge}$ ... $^{84}\text{Ge}$ ) s različitim vremenima poluraspada. Od tih najdulje vrijeme poluraspada (287 dana) ima  $^{68}\text{Ge}$ .

Elektronska konfiguracija atoma germanija jest  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$ , te je on u svojim spojevima dvovalentan i četverovalentan.

Tablica 1

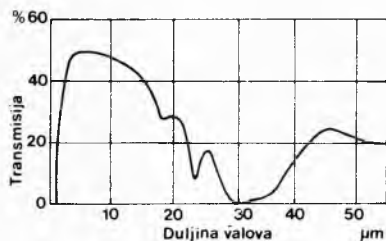
IZOTOPSKI SASTAV PRIRODNOG GERMANIJA (OBJAVLJENO 1974.)

Izotop	$^{70}\text{Ge}$	$^{72}\text{Ge}$	$^{73}\text{Ge}$	$^{74}\text{Ge}$	$^{76}\text{Ge}$
Sadržaj %	20,7	27,5	7,7	36,4	7,7

**Fizikalna svojstva.** Elementarni germanij crnosiva je kristalna tvar s rešetkom dijaminskog tipa i sjajnim kristalnim plohami. Vrlo je krk i nebradiv. Talište mu je  $937,4^\circ\text{C}$ . Na toj temperaturi gustoća kapljevitog germanija jest 5,576, a gustoća čvrstog na  $20^\circ\text{C}$  jest  $5,35\text{gcm}^{-3}$ , što znači da skrutnjavanjem ekspanzira za 6,6 vol.%. Vrelište mu je  $2830^\circ\text{C}$ .

Germanij je poluvodič koji lako otcjepljuje valencijske elektrone. Specifični električni otpor vrlo čistog (intrinzičnog) germanija (iznad  $47\Omega\text{cm}$ ) opada s rastom temperature. Vrlo malim dodacima (npr. u omjeru od 1:10<sup>6</sup>) tvari s kojima stvara kristale mješance, kao što su neki susjedni elementi u periodskom sustavu (npr. fosfor, arsen, aluminij, galij), njegova se električna vodljivost veoma povećava a smanjuje njena zavisnost od temperature, ili čak obrće (njen predznak) tako da (doduše neznatno) kao i kod vodiča opada s temperaturom.

Vrlo važno svojstvo germanija jest njegova vrlo visoka propusnost za infracrveno (IC) zračenje (sl. 1), u području duljina valova 2...12 $\mu\text{m}$  praktički konstantna uz optički lom od 4,12...3,96.



Sl. 1. Transmisija infracrvenog zračenja kroz sloj germanija debljine 2mm

**Kemijska svojstva.** Metalni germanij postojan je na zraku. U atmosferi kisika iznad  $400^\circ\text{C}$  i u dušičnoj kiselini pasivira se stvaranjem oksidnog sloja. Koncentrirana sumporna i solna kiselina polako ga nagriza. U alkalnim lužinama praktički je netopljiv, osim ako ne sadrži oksidante kao što su natrij-hipoklorit, vodik-peroksid, kad se otapa vrlo brzo čak i u hladnoj otopini.

Sa silicijem stvara neprekinuti niz kristala mješanaca, a s kositrom eutektički sustav.

**Dobivanje sirovog germanija** općenito obuhvaća proizvodnju i zatim redukciju germanij(IV)-oksida. Procesi dobivanja germanij(IV)-oksida međusobno se razlikuju, već prema tome kakva je sirovina na raspolaganju, ali postoje i različiti postupci preradbe istih sirovina. Važnije sirovine za proizvodnju germanij(IV)-oksida danas su koncentrat bakra i olova koji se dobivaju trostepenom flotacijom ruda iz Tsumeba. Oni sadrže 0,20...0,45% vezanog germanija. Za dobivanje germanij(IV)-oksida iz njih služe tzv. mokri i, danas mnogo važniji, suhi postupci. Danas još važnija sirovina za dobivanje germanij(IV)-oksida jest koncentrat renierita koji se dobiva magnetskom separacijom iz navedenih koncentrata bakra i olova. (Dobivanje je tog koncentrata moguće, jer je renierit feromagnetičan.)

Od ostalih sirovina za dobivanje germanij(IV)-oksida danas još dolazi u obzir i prašina iz elektrofilitara plinova od prženja sulfidnih ruda bakra, olova, cinka, možda i prašina od rasplinjavanja i pepeo od spaljivanja spomenutih kamenih ugljena.

*Mokri postupci dobivanja germanij(IV)-oksida* iz koncentrata bakra i olova obuhvaćaju postupke kiselim i bazičnim raščinjanjem. Pri kiselom raščinjanju koncentrat se tretira smjesom dušične i sumporne kiseline. Time se iz njega uklanja najveći dio vezanog bakra i arsena. Ostatak se otopi u solnoj kiselini, pa se iz otopine odestilira germanij(IV)-klorid strujom klora i zatim ukaplji. Iz ukapljenog germanij(IV)-klorida dobiva se germanij(IV)-oksid, kao i u ostalim postupcima.

Pri bazičnom raščinjanju koncentrat se tretira jakom alkalnom lužinom. Smanjivanjem pH iz otopine se najprije izdvajaju hidroksidi arsena i galija frakcijskim izlučivanjem, a zatim germanij(IV)-oksid.

*Suhi postupak dobivanja germanij(IV)-oksida* iz sulfidnih koncentrata bakra i olova (sl. 2) obuhvaća peletiziranje tih koncentrata, sublimaciju germanij(II)-sulfida iz njih, oksidacijsko prženje sublimata, otapanje prženca i destilaciju sirovog germanij(IV)-klorida iz otopine, njegovu rafinaciju i konverziju u germanij(IV)-oksid hidrolizom, te izdvajanje germanij(IV)-oksida iz hidrolizata.

Za peletizaciju koncentrat se prethodno samelje, a za vezivo se obično upotrebljava katransko ulje (10 tež.% računato na koncentrat). Peletizirani materijal se osuši i prosije da bi se uklonile sitnije čestice koje bi mogle smetati pri sublimaciji. Propad se vraća u proces.

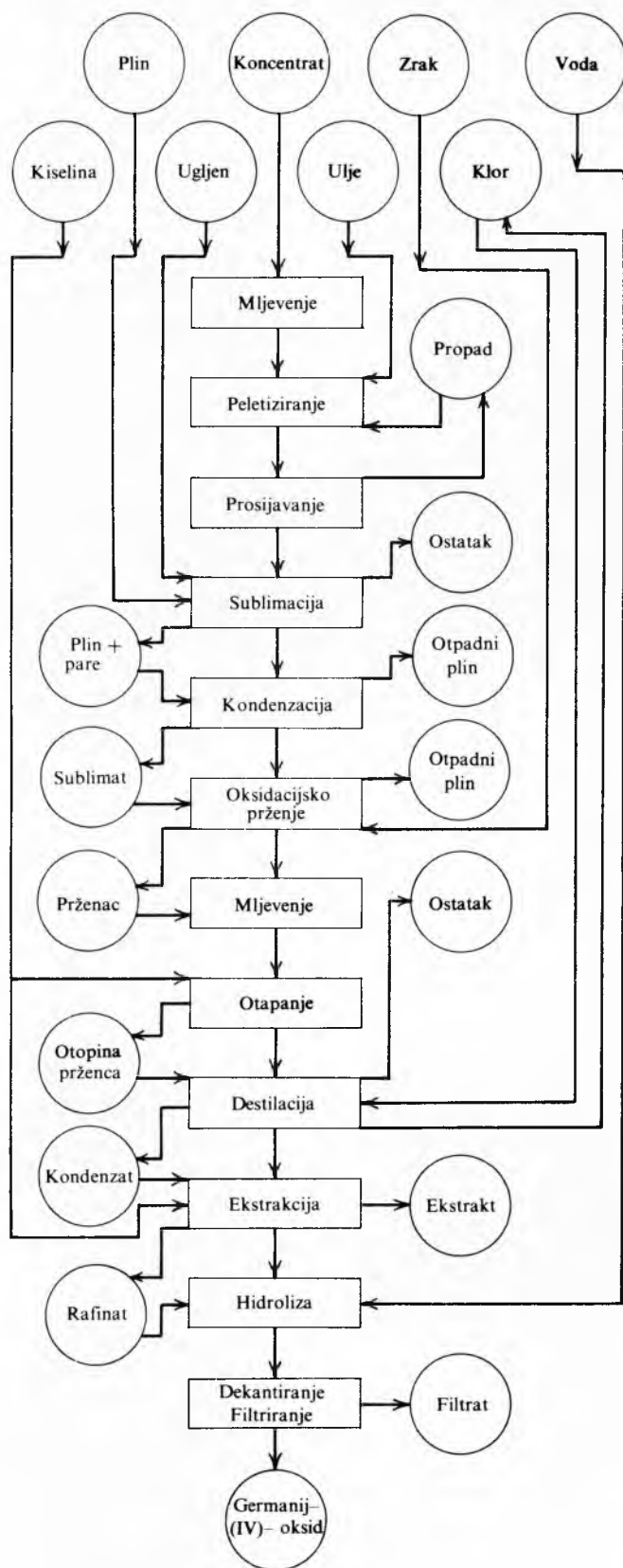
Sublimacija se izvodi grijanjem peletiziranog materijala obično s koksom i u struji generatorskog plina na  $870\text{--}890^\circ\text{C}$ . Pri tome među ostalim hlapljivim spojevima redukcijom nastaje te otparava i germanij(II)-sulfid. Zatim se kondenzira sublimat. Troši se obično ~10 tež.% koks računato na peletizirani materijal. Struja generatorskog plina služi za osiguranje redukcijske atmosfere. Taj plin treba sadržavati ~32 vol.% ugljik(II)-oksida. Aparatura za taj proces (sl. 3) sastoji se od peći i uređaja za izdvajanje prašine i sublimata iz plinova koji izlaze iz peći (komora za otprašivanje, ciklona i filtera s vrećama; v. Čišćenje plinova TE3, str. 115). Peć se šaržira smjesom peletiziranog materijala i kokska. Grije se izgaranjem mazuta u plaštu. Ostatak se izvodi iz peći pokretnim roštiljem. Može se upotrijebiti za proizvodnju bakra i olova. Sublimat sadrži 1,8...2,3% vezanog germanija.

Oksidacijsko prženje sublimata, koje slijedi, obuhvaća konverziju sulfida u okside zrakom na  $500\text{--}700^\circ\text{C}$  i sublimaciju lakše hlapljivih sastojaka, osobito arsen(III)-oksida. Za ovu operaciju služi elektrotermijska peć i aparatura za otprašivanje i kondenzaciju, slična onoj na sl. 3. Sublimat koji se tu skuplja sastoji se uglavnom od arsen(III)-oksida i takav se upotrebljava (v. Arsen, TE1, str. 424). Prženac koji zaostaje sadrži 20...30% germanij(IV)-oksida.

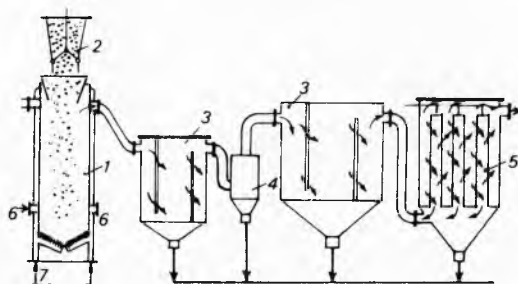
Za otapanje prženca upotrebljava se 6N solna kiselina. (Otapanjem se njena koncentracija veoma smanji.) Destilacijom u struji klora, koja slijedi, iz te se otopine istjera sav germanij(IV)-klorid tako da se, pošto se njegova glavna količina otpari na vrelištu (83°C), temperatura podigne do 110°C. Pri tome otpari i nešto spojeva arsena, ali zbog njihovog znatno

višeg vrelišta njihova glavna količina zaostaje u otopini zajedno sa spojevima olova.

Germanij(IV)-klorid može se rafinirati rektifikacijom ili, kako je prikazano, ekstrakcijom solnom kiselinom (također 6N) zasićenom klorom. Pri toj je koncentraciji kiseline topljivost germanij(IV)-klorida minimalna, a glavna spojeva arsena konvertira se u arsen(V)-klorid i otapa se. Razmjerno vrlo čisti destilirani germanij(IV)-klorid dobiva se redestilacijom u prisutnosti strugotina bakra. Rafinat dobiven ekstrakcijom dalje se može čistiti od primjesa adsorbentima (silikagelom, aktivnim ugljenom).

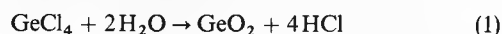


Sl. 2. Principijelna shema proizvodnje germanij(IV)-oksida iz sulfidnih koncentrata bakra i olova



Sl. 3. Shema aparature za sublimaciju germanij-sulfida iz sulfidnih koncentrata bakra i olova. 1 peč, 2 uređaj za šaržiranje peći, retorte, 3 komore za otprašivanje, 4 ciklon, 5 filter s vrećama, 6 dovod plina, 7 dovod mazuta i zraka

Rafinat se podvrgava hidrolizi polaganim dodavanjem u četverostruku do peterostruku količinu ionskom izmjenom demineralizirane i zatim redestilirane vode, tako da reakcijom



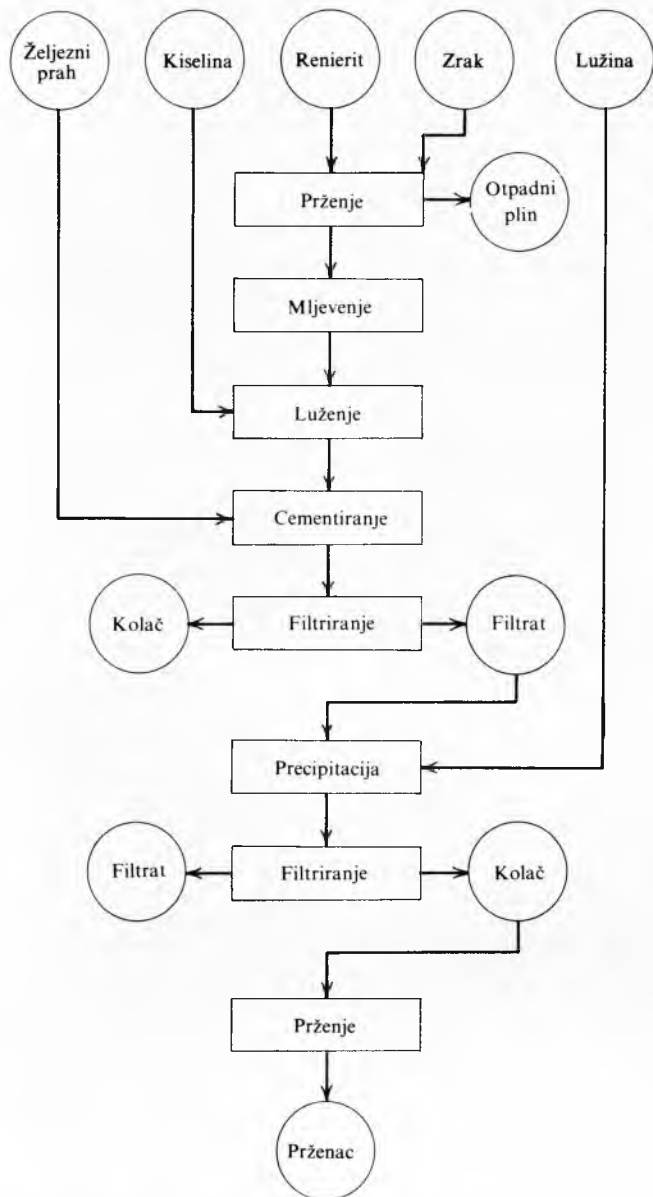
opet nastane 5...6N solna kiselina u kojoj je topljivost germanij(IV)-oksida minimalna, uz intenzivno miješanje. Precipitat se odijeli dekantiranjem i filtriranjem i suši na 105...110°C.

Dobivanje germanij(IV)-oksida iz koncentrata renierita također obuhvaća opisane operacije konverzije spojeva germanija u germanij(IV)-klorid kao fazni proizvod i operacije koje iza toga slijede. Međutim, proces dobivanja prženca germanij(IV)-oksida koji prethodi (sl. 4) u tom je postupku jednostavniji. Tu se koncentrat renierita izravno podvrgava oksidacijskom prženju. Taj se prženac samelje i luži jakim sumpornom kiselinom. Iz na taj način dobivene otopine cementira se najveći dio bakra, arsena i drugih metala željeznim prahom. Cementat se odvoji filtriranjem kao filterski kolač, a filtrat tretira lužinom (otopinom natrij-hidroksida). U precipitatu, koji se time dobiva, nalazi se sav germanij vezan kao hidroksid i hidroksidi drugih metala koji su bili prisutni u otopini nakon cementiranja (hidroksidi željeza, bakra, arsena, itd.). Taj se precipitat odvoji filtracijom i prži, a zatim se prženac dalje prerađuje kako je već opisano.

Dobivanje germanij(IV)-oksida iz otpadaka od proizvodnje cinka i bakra i preradbe ugljena moguće je nizom postupaka. Najsuvremeniji među njima zasniva se na izolaciji spojeva germanija sorpcijom iz lugova dobivenih tretiranjem otpadaka sumpornom kiselinom. Poznati preparat za to je Wofatit EW, prije toga obrađen taninom. Sorbat pri tome nastaje ionskom izmjenom. Eluira se 9...10N solnom kiselinom. Dalje operacije postupka jesu već opisane destilacija germanij(IV)-klorida iz eluata i hidroliza.

Germanij(IV)-oksid reducira se pomoću vodika. (Druge metode redukcije nemaju značenje za praksu.) Vodik za taj proces mora biti vrlo čist. Čisti se filtriranjem i sušenjem, uklanjanjem kisika, ponovnim sušenjem i adsorpcijom primjesa. Za to služi uređaj od nekoliko kolona: dvije ispunjene silikagelom (za obradu prije i poslije uklanjanja kisika), jedne ispunjene katalizatorom (obično prahom bakra) za reakciju vodika s kisikom i dvije ispunjene zrnjem kalij-hidroksida.

Da bi se smanjili gubici sublimacijom germanij(IV)-oksida, redukcija se izvodi najprije na 630...650°C, pri čemu reagira glavni dio materijala, zatim na 680...700°C i na kraju na 750...800°C, pri čemu reagira ostatak. Nakon toga se praškasti germanij rastali na 1000...1100°C i ohladi uz izvlačenje u



Sl. 4. Principijelna shema dobivanja prženca u proizvodnji germanij(IV)-oksida iz koncentrata renierita

oblik prikladan za rafinaciju metala. Izvlačenjem germanija postiže se usmjerena kristalizacija koja olakšava rafinaciju.

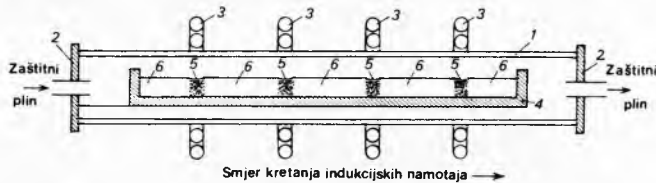
Za takvo vođenje procesa služe automatski regulirane otporske elektrotermijske peći, ili baterije tih peći od kojih svaka služi za jednu fazu procesa, te tignjevi koji se šaržiraju germanij(IV)-oksidom. Najprikladniji materijal za te tignjeve je grafit, jer germanij ne reagira s ugljikom.

**Rafinacija germanija.** Pod čistim germanijem kakav se danas skoro isključivo traži na tržištu razumijeva se materijal s najmanje (100–10<sup>-9</sup>)% Ge. Tako čisti germanij može se dobiti jedino rafinacijom zonalnim taljenjem.

**Zonalno taljenje** je poboljšano odvajanje kristalnih tvari jednih od drugih iz njihovih smjesa prekrystalizacijom iz taline. Prije otkrića zonalnog taljenja (W. G. Pfann, 1952) moralo se izdvajanje pojedinih sastojaka prekrystalizacijom iz taline izvoditi tako da se rastali čitava smjesa, pa se djelomično kristaliziraju i odvoje tako dobiveni kristali od taline. Postupak se zatim morao ponavljati potreban broj puta. Dakako, to je bio vrlo tegoban posao, povezan s velikim gubicima, osobito kad se radilo o smjesama s visokim talištima.

Međutim, pri zonalnom taljenju (sl. 5) prekrystalizacija se namjesto iz taline čitave mase materijala izvodi u nizu uskih rastaljenih zona na jednom od materijala načinjenom dugoljastom komadu, najbolje šipki, a zone su odvojene jedna od druge područjima čvrstog stanja i polako se pomiču s jednog kraja komada prema drugome. (Princip za to potrebno grijanje je različit, već prema tome kakav se materijal rafinira. Tako npr. grijanje za rafinaciju metala može biti induksijsko, elektrolyučno ili pomoću plazme, za rafinaciju neovdiča kapacitivno ili mikrovalno, za rafinaciju organskih tvari pomoću spi-

rale s medijem za prijenos topline.) Pri tome je bitno da se granice faza na krajevima zona, kao mjesta na kojima se odvajaju primjese, stalno obnavljaju, pa je, u stvari, zonalno taljenje kontinualna prekrystalizacija materijala s jednog prema drugom kraju šipke i za nju vrijede isti zakoni kao i za ravnotežne sustava od kapljevitih i čvrstih faza (v. *Fazne ravnoteže*, TE5, str. 377).



Sl. 5. Princip zonalnog taljenja. 1 cilindar od kremenog stakla, 2 zaporne prirubnice, 3 namoti induksijskih grijaača, 4 grafitna posuda, 5 rastaljene zone, 6 područja čvrstog stanja

Sadržaj neke određene primjese u fazama nekog od tih sustava, npr. sustava čvrstog sirovog metala i njegove taline, određen je koeficijentom raspodjele

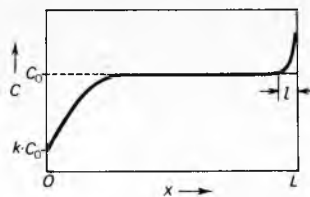
$$k = \frac{c_s}{c_l} \quad (2)$$

gdje su  $c_s$  i  $c_l$  koncentracije te primjese u čvrstoj tvari i talini. Za njegovo izračunavanje iz ravnotežnog koeficijenta raspodjele ( $k_0$ ) može se izvesti izraz

$$k = \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0)\exp(-f/D)} \quad (3)$$

gdje je  $f$  brzina skrutnjavanja,  $D$  koeficijent difuzije primjese,  $l$  debljina rastaljene zone. Odatle slijedi da će se atomi s većim koeficijentom difuzije nakupljati u rastaljenoj zoni, odnosno sastojci kojima je  $k > 1$  u čvrstoj, a oni kojima je  $k < 1$  u rastaljenoj fazi sustava, i to tim više što su te vrijednosti  $k$  veće, odnosno manje.

Pri gibanju rastaljene zone s jednog u smjeru drugog kraja štapa od materijala koji se rafinira, koncentracija ( $c$ ) primjese sa  $k < 1$  raste kako u talini tako i u kristalozatu koji se iz nje izlučuje, dok ne dosegne koncentraciju ( $c_0$ ) prije početka taljenja i kad se njeni sadržaji u kristalizatima koji se tale i kristalizatima koji se skrutnjavaju izjednačuju. Međutim, talina i dalje sadrži više te primjese nego čvrsta područja s kojima graniči, a potpuno je izlučuje istom kad se sama sasvim skrutne na kraju štapa. Zbog tog procesa koncentracija te primjese nije više jednolična u čitavoj masi materijala, već, kao funkcija udaljenosti  $x$  od početka štapa, ima karakterističan tok (sl. 6).



Sl. 6. Tok koncentracije jedne primjese  $k < 1$  u štapi od materijala rafiniranog jednokratnim zonalnim taljenjem

Odatle se vidi da je koncentracija te primjese u dijelovima štapa bližim početku u velikoj mjeri smanjena, a u dijelu na drugom kraju, koji je dug koliko je široka zona, u velikoj mjeri povećana. Ponavljanjem se procesa područje sa smanjenom koncentracijom primjese proširuje, ali je efekt te rafinacije u određenoj aparaturi ograničen, jer ovisi ne samo o koeficijentu raspodjele, nego i o omjeru širine rastaljenih zona i duljine štapa.

Uvjeti potrebni za željeni efekt te rafinacije predviđivi su pomoću izraza za traženu koncentraciju primjese na nekom određenom mjestu  $x$  šipke

$$c_x = A e^{Bx} \quad (4)$$

koji je izveo W. G. Pfann, gdje su  $A$  i  $B$  konstante određene za šipku duljine  $L$  izrazima

$$k = \frac{BL}{e^{BL} - 1} \quad (5)$$

$$A = \frac{c_0 BL}{e^{BL} - 1} \quad (6)$$

Zbog složenosti ti se računi izvode pomoću elektroničkih računala.

Iznimno lako dobivanje izvanredno čistog germanija zonalnim taljenjem moguće je zbog vrlo povoljnih koeficijenata raspodjele primjese u njemu. Tako se npr. (tabl. 2) ravnotežni koeficijenti raspodjele glavnih primjesa u germaniju mnogo više razlikuju od jedan, nego što se to razlikuju ravnotežni koeficijenti raspodjele tih istih primjesa u siliciju. (Zbog toga se silicij, germaniju glavni konkurentni materijal, koji također sadrži te primjese, a uz to i dosta bora, rafinira zonalnim taljenjem znatno teže.) Za dobivanje germanija tražene čistoće

Tablica 2

RAVNOTEŽNI KOEFICIJENTI RASPODJELE NAJVAŽNIJIH PRIMJESA U KAPLJEVITOJ I ČVRSTOJ FAZI GERMANIJA I SILICIJA

Primjese	Li	B	Al	Ga	In	Si	Ge	Sn	P	As	Sb	O	Ostali elementi
$k_0$ u Ge	0,002	17	0,073	0,087	0,001	5,5	1	0,02	0,08	0,02	0,003	—	$< 10^{-3}$
u Si	0,01	0,80	0,002	0,008	$4 \cdot 10^{-4}$	1	0,33	0,016	0,35	0,3	0,023	0,5	$< 10^{-3}$

dovoljno je sirovi materijal tretirati sa 10–20 ciklusa zonskog taljenja i ukloniti dijelove u kojima su se koncentrirale primjese.

**Preradba germanijskih otpadaka.** Od rafinacije i kasnije preradbe germanija otpadaju razmjerno vrlo velike količine materijala. Većina tih otpadaka sadrži dovoljno mnogo germanija da se može preraditi kloriranjem u solnoj kiselini i zatim dalje kako je već opisano. Neki otpaci, npr. prah od brušenja, koji sadrže manje germanija tretiraju se najprije otopinom natrij-hidroksida, a germanij(IV)-klorid dobiva se iz time nastale otopine zakiseljavanjem solnom kiselinom i kloriranjem.

**Proizvodnja i upotreba germanija.** Zbog visoke propusnosti za IC-zračenje germanij se danas najviše upotrebljava u IC-optici za 1–30mm debele konstrukcijske dijelove (npr. leće promjera 6–400mm, prozore) aparata za IC-spektrometriju, gdje služe kao fotokonduktivni elementi i IC-detektori. Za IC-optiku vjerojatno se troši ~45% od svjetske proizvodnje germanija. (Ona je vjerojatno blizu 100t/god.)

U novije se vrijeme u optici germanij upotrebljava i kao sredstvo za dotiranje silicij(IV)-oksida u proizvodnji svjetlovodnih vlakana.

Usprkos opadanju značenja germanija u elektronici, u toj se oblasti u svijetu još uvijek troši vjerojatno ~25% od nje-gove proizvodnje, najviše u izradbi specijalnih dioda za mikrovalnu tehniku, za ispravljače velike snage uz mali napon.

Znatna je i upotreba germanija u nuklearnoj i akcelerator-skoj tehnici. Tako je germanij s dodatkom litija odličan de-tekto- r za  $\gamma$ -zrake, protone i druge čestice s velikom energijom, jer mu je koeficijent apsorpcije velik, a energija potrebna za formiranje ionskih parova mala. Jedna legura germanija s nio-bijem i aluminijem postaje supravodljiva već iznad vrelišta vodika (na 20,7K). Među ostalim, taj se efekt može iskori-stiti za proizvodnju jakih magnetskih polja potrebnih za fuziju.

Germanij služi kao legirajući element i za neke druge svrhe. Tako se npr. malim dodacima germanija može povećati tvrdoća kositra i poboljšati obradljivost duraluminija valjanjem. Slitine zlata i germanija služe za lemljenje nakita i, zbog ekspanzije pri skrutnjavanju, u zubnoj tehnici.

### SPOJEVI GERMANIJA

Općenito su kemijska svojstva germanija slična kemijskim svojstvima silicija. Ipak, germanij je kemijski aktivniji. Otapa se u koncentriranoj dušičnoj i koncentriranoj sumpornoj kiselini, i, u prisutnosti vodik-peroksida, u razrijeđenim lužinama.

Prema elektronskoj konfiguraciji u germaniju se, kao i u ostalim elementima IVa podskupine periodnog sustava, očekuje stvaranje spojeva u kojima je stupanj oksidacije germanija  $-4$ ,  $-2$ ,  $+2$  i  $+4$ .

Od spojeva germanija u kojima se germaniju pripisuje nega-tivan stupanj oksidacije postoje silanima analogni germanij-hidridi, poznati još i pod nazivom *germani*: monogerman  $\text{GeH}_4$  (vrelište  $-88,4^\circ\text{C}$ , talište  $-165,9^\circ\text{C}$ ), digerman  $\text{Ge}_2\text{H}_6$  (vrelište  $29^\circ\text{C}$ , talište  $-109^\circ\text{C}$ ) i trigerman  $\text{Ge}_3\text{H}_8$  (vrelište  $110^\circ\text{C}$ ). Kako je elektronegativnost germanija (1,8) manja od elektronegativnosti vodika (2,1), strogo gledajući, stupanj je oksidacije ger-manija u tim spojevima pozitivan. Negativni stupanj oksida-cije germanija pripisuje se tu zbog analogije tih spojeva s ugljikovodicima. Germanij se obično dobivaju iz germanij(IV)-klorida i litij-hidrida u eteru. Upotrebljavaju se za dobivanje specijalnih katalizatora od tankih slojeva germanija na supstra-tima (npr. staklu) termičkim raspadom iznad  $300^\circ\text{C}$ .

Derivatima germana mogu se smatrati *germanidi*, spojevi germanija s metalima (poznati su npr.  $\text{Mg}_2\text{Ge}$ ,  $\text{V}_3\text{Ge}$ ,  $\text{Cr}_3\text{Ge}$ ,  $\text{Mo}_3\text{Ge}$ ), strukturom i svojstvima mnogo slični silicidima, i

organski spojevi germanija, među kojima su najpoznatiji tetra-metil-germanij  $\text{Ge}(\text{CH}_3)_4$ , tetraetil-germanij  $\text{Ge}(\text{CH}_2\text{CH}_3)_4$ , te-trafenil-germanij,  $\text{Ge}(\text{C}_6\text{H}_5)_4$ . Organski spojevi germanija služe kao terapeutici protiv grampozitivnih bakterija.

Spojevi germanija, u kojima je njegov stupanj oksidacije  $+2$ , ne mogu biti postojani zbog toga što germanij, kao ni silicij, ne može stvarati dvostruke veze, barem ne kako to mo-že prvi element njihove podskupine, ugljik, niti ima metalni karakter koji dopušta njegovom drugom susjedu u toj podsku-pini, kositru, stvaranje spojeva s ionom  $\text{Sn}^{2+}$ . Zbog toga se svi Ge(II)-spojevi vrlo lako oksidiraju u Ge(IV)-spojeve, tj. dje-luju kao vrlo snažna redukcijska sredstva. Poznata su sva če-tiri Ge(II)-halogenida, kao i germanij(II)-oksid i germanij(II)-sulfid.

Najvažniji su spojevi germanija oni u kojima je njegov stupanj oksidacije  $+4$ . Poznata su sva četiri Ge(IV)-haloge-nida. Od njih je najvažniji Ge(IV)-klorid. Najvažniji Ge(IV)-spoj je germanij(IV)-oksid. Od tih spojeva stanovitu tehničku važnost imaju još i germanati (soli germanatne kiseline,  $\text{H}_4\text{GeO}_4$ , koja nije poznata u slobodnom stanju).

*Germanij(IV)-klorid* ( $\text{GeCl}_4$ , talište  $-49,5^\circ\text{C}$ , vrelište  $83,1^\circ\text{C}$ ) pod običnim je uvjetima bezbojna kapljevin. Važan je kao fazni proizvod u proizvodnji germanija, jer se lako dobiva kako iz germanij(II)-oksida (pomoću solne kiseline), tako i iz elemen-tarnog germanija (također pomoću solne kiseline, u struji klora i u prisutnosti feriklorida), lako izdvaja destilacijom (zbog raz-mjerno niskog vrelišta), ne miješa se sa solnom kiselinom i lako hidrolizira.

Germanij(IV)-klorid donekle je važan i kao ishodni mate-rijal za dobivanje organskih spojeva germanija, jer lako stupa u mnoge organske reakcije (npr. Grignardove, Wurtz-Fittigove sinteze).

*Germanij(IV)-oksid* ( $\text{GeO}_2$ ) nalazi se u tri modifikacije s raz-ličitim fizikalnim svojstvima. Normalno se dobiva kao bijela tvar kristalizirana u heksagonskom sustavu, slična  $\alpha$ -kremenu (talište  $1115^\circ\text{C}$ ). Ako se heksagonski germanij(IV)-oksid navlaži otopinom amonij-fluorida i žari iznad  $380^\circ\text{C}$ , dobiva se siva modifikacija koja kristalizira u tetragonskom sustavu. Iznad  $1033^\circ\text{C}$  ta modifikacija opet prelazi u heksagonsku. To je bez-bojno staklo izgledom slično kremenu. Heksagonska modifi-kacija germanij(IV)-oksida slabo se topi u vodi, a tetragonska je netopljiva. Iznad  $1250^\circ\text{C}$  germanij(IV)-oksid dosta brzo sub-limira.

Germanij(IV)-oksid lako nastaje iz germanija ili germanij-(IV)-sulfida žarenjem iznad  $700^\circ\text{C}$  u prisutnosti kisika. Pri nastajanju hidrolizom iz germanij(IV)-klorida najprije se formira voluminozni gel koji sadrži mnogo vode. Ali već stajanjem pod vodom iz toga se izlučuju kristali germanij(IV)-oksida i gel nestaje. Već običnim sušenjem može se sadržaj vode tih kri-stala smanjiti na ~3%. Smatra se da je voda koju sadrži taj proizvod vezana adsorpcijom. (Definirani hidroksidi germanija dosad nisu izolirani.)

Osim kao fazni proizvod pri dobivanju germanija, germa-nij(IV)-oksid važan je i kao katalizator za dobivanje nekih poli-esterskih smola i kao dodatak u proizvodnji stakala koja jako lome svjetlo, te za izradbu dijelova mikroskopa.

*Germanati* se mogu dobiti precipitacijom iz vodenih otopina, ali obično se proizvode taljenjem germanij(IV)-oksida s bazičnim oksidima. Takvim taljenjem dobivaju se npr. cink-germanat  $\text{Zn}_2\text{GeO}_4$ , natrij-germanat  $\text{Na}_2\text{GeO}_3$ , magnezij-germanat  $\text{Mg}_2\text{GeO}_4$ , kao staklaste tvari. Natrij-germanat također se upo-trebljava kao katalizator za dobivanje nekih poliesterskih smola. Magnezij-germanat upotrebljava se za dobivanje stakala propusnih za IC-zračenje i druge svrhe u IC-optici, također i za izradbu luminofora koji se upotrebljavaju u nekim fluorescen-

tnim sijalicama. (Npr. za dobivanje tamnocrvenog svetla pomoću živinih sijalica.) I neki drugi germanati upotrebljavaju se kao fluorescentne tvari.

LIT.: E. G. Rochov, E. W. Abel, The chemistry of germanium, tin, and lead. Pergamon, New York 1975. — B. Đurković, D. Đurković, Metalurgija retkih metala. Građevinska knjiga, Beograd 1976.

Ž. Viličić Z. Šternberg

**GIROSKOP** (ponekad žiroskop), kruto telo koje poseduje osu materijalne simetrije oko koje se brzo obrće, pri čemu obrtna osa tela može da menja svoj pravac u prostoru, i pri čemu za sve vreme obrtanja takvog tela jedna tačka na obrtnoj osi tela ostaje nepomična. Ugaona brzina obrtanja tela mnogo puta je veća od ugaone brzine kojom se obrće osa tela.

Svojstva giroskopa poseduju nebeska tela, artiljerijski projektili, rotori turbina, različite instalacije na brodovima, elise aviona itd.

U suvremenoj tehnici giroskop jest osnovni element moćnih giroskopskih uređaja ili pribora, koji se koriste za automatsko upravljanje kretanja aviona, brodova, torpeda, raketa itd. Giroskopi se isto tako koriste u navigaciji, zatim za stabilisanje kretanja brodova po valovitom i uzburkanom moru, za promenu ugaonih ili translatornih brzina raketa, a također i za mnoge druge specijalne ciljeve.

Osobena stabilnost koju zadobija čigra (zvrk) kada se brzo obrće bila je poznata od davnina. Problem o svojstvima brzorotirajuće čigre bio je bitan u istoriji mehanike krutog tela. Paradoksalne pojave koje se ispoljavaju kod brzorotirajućih tela, a koje se u današnje doba nazivaju giroskopskim pojavama, vrlo rano su privlačile pažnju najbriljantnijih umova na polju mehanike.

Termin giroskop (franc. gyroscope, od grč. gyros i skopein) uveo je u nauku francuski fizičar L. Foucault (1852) za pribor koji je konstruisao, a čiji je osnovni deo bio rotor koji se brzo obrtao. Pomoću tog pribora on je prvi eksperimentom u laboratoriji utvrdio činjenicu obrtanja Zemlje tokom 24 časa oko svoje ose.

U današnje doba termin giroskop ima daleko širi smisao kojim se nazivaju bilo kakvi uređaji, kod kojih se koriste svojstva i osobine tela koja brzo rotiraju.

Mehaniku krutog tela u sistematskom obliku po prvi put je izložio L. Euler (1765) u svom znamenitom delu *Teorija kretanja krutih tela*. U tom se delu po prvi put nalazi prilično detaljna teorija kretanja čigre koja brzo rotira.

Jedan od najvažnijih delova nebeske mehanike jesu pojave vezane za obrtna kretanja nebeskih tela. Već u najranijoj epohi razvoja mehanike bilo je utvrđeno da se na ove pojave može primeniti teorija kretanja čigre. Nebeska tela nisu ništa drugo do ogromne čigre ili giroskopi koji poseduju specifična svojstva brzorotirajućih tela. Na tom osnovu izgrađena je teorija kretanja nebeskih tela, koju je prvi izložio J. R. D'Alembert (1749), a zatim L. Euler (1765). Ti prvi začeci astronomije bili su moćni stimulus za dalji razvitak mehanike krutog tela u radovima P. S. Laplacea, J. L. Lagrangea i drugih.

Isto tako je davno bilo poznato da se ustanovljena specifična i osobena svojstva tela koja brzo rotiraju mogu korisno primeniti i u različitim oblastima tehničke prakse. Već 1752. god. Serson je predložio da se giroskop koji brzo rotira upotrebi kao navigacioni instrument.

Tokom daljih godina pojedinci su davali svoje dalje doprinose razvoju ovog područja mehanike. Od tih daljih doprinosa treba pomenuti najpre opite koje je 1852. god. izveo L. Foucault u pariskom Pantheonu pred članovima Pariske akademije nauka, kojima je po prvi put iznet ideja o giroskopskom kompasu. Međutim, da bi se ostvarile ideje koje je predložio L. Foucault, bilo je potrebno da se savladaju ogromne prepreke čisto tehničke prirode.

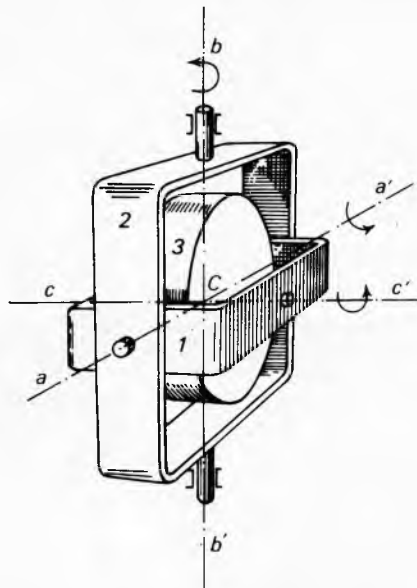
Nagli razvitak tehnike početkom XX veka, a posebno elektrotehnike, omogućio je da se konstruišu za tadašnje pojmove savršeni giroskopski uređaji koji su dobili opšte priznanje. Od takvih uređaja na prvom mestu je giroskompas E. A. Sperrya (1911), koji se ubrzo primenjivao u flotama zemalja čitavog sveta.

U današnje doba giroskopske pojave zadobivaju sve veći značaj u različitim oblastima tehnike. Vrlo brzo raste broj giroskopskih uređaja različite vrste, kod kojih se koriste pomenuta svojstva za različite ciljeve. Brojni su vojni uređaji, čija konstrukcija počiva na principima giroskopa. Tehničke primene giroskopa u današnje doba toliko su mnogostruke i raznovrsne da je nastala potreba da se iz opšte teorije giroskopa izdvoji posebna disciplina, koja obično naziva *primenjenom teorijom giroskopa*.

## GIROSKOP SA TRI STEPENA SLOBODE

Da bi osa giroskopa mogla slobodno da se obrće u prostoru, giroskop se obično pričvršćuje u prstenove tzv. *kardanske vešaljke* (okvira, rama) (sl. 1). Tom prilikom se ose unutrašnjeg prstena ( $a - a'$ ), spoljašnjeg prstena ( $b - b'$ ) i giroskopa ( $c - c'$ ) seku u jednoj tački, koja se naziva *centrom vešanja*  $C$ , a koja je nepomična za sve vreme kretanja giroskopa. Pričvršćen u ovak-

voj vešaljci (okviru, ramu), giroskop ima tri stepena slobode i može se bilo kako obrtati oko centra vešanja. Ako se težište giroskopa poklapa sa centrom vešanja, giroskop se naziva *uravnoteženim ili slobodnim*. Ako je obrtna osa giroskopa osa njegove materijalne simetrije, takav giroskop se onda naziva *simetričnim*. Proučavanje zakona kretanja giroskopa zadatak je dinamike krutog tela.



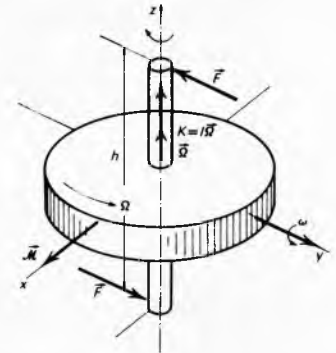
Sl. 1. Giroskop sa tri stepena slobode: klasična kardanska vešaljka (ram, okvir). 1 unutrašnji prsten, 2 spoljašnji prsten, 3 rotor giroskopa; obrtna osa unutrašnjeg prstena ( $a - a'$ ), obrtna osa spoljašnjeg prstena ( $b - b'$ ), obrtna osa rotora giroskopa ( $c - c'$ );  $C$  centar vešanja

## OSNOVNA SVOJSTVA GIROSKOPA

**Precesija.** Ako se na osu giroskopa koji brzo rotira deluje spregom sila momenta  $M = Fh$  (sl. 2), tada će nasuprot očekivanju giroskop započeti dopunsko obrtno kretanje ne oko ose  $x$ , upravne na ravan dejstva sprega, već oko ose  $y$ , koja leži u ravni dejstva sprega i koja je upravna na osu  $z$  materijalne simetrije giroskopa. Ovo dopunsko obrtno kretanje naziva se *precesijom*. Precesija se vrši u odnosu na inercijalni referentni sistem ugaonom brzinom  $\omega$ , koja je određena formulom

$$\omega = M/I\Omega \quad (1)$$

gdje je  $I$  moment inercije giroskopa za obrtnu osu  $z$  koja se naziva i *figurnom* osi, a  $\Omega$  ugaona brzina sopstvenog obrtanja giroskopa oko iste ose  $z$ . U vezi sa kretanjem giroskopa važna je veličina  $K = I\Omega$ , koja se naziva *sopstvenim kinetičkim momentom giroskopa*. Pravci i smerovi vektora  $\vec{\omega}$ ,  $\vec{M}$  i  $\vec{K}$  prikazani su na sl. 2. Ugaona brzina precesionog obrtanja  $\omega$  mnogo je manja od ugaone brzine sopstvenog obrtanja  $\Omega$ , manja čak i milion puta.



Sl. 2. Precesija giroskopa. Vektor ugaone brzine precesije  $\vec{\omega}$  usmeren je tako da vektor kinetičkog momenta  $\vec{K}$  teži da se poklopi sa vektorom momenta  $\vec{M}$  sprega sila koje deluju na giroskop

**Nutacija.** Pri strožijem proučavanju može se pokazati da je sopstveno obrtno kretanje i precesija simetričnog giroskopa praćeno, odnosno združeno sa *nutacijom* — brzim koničnim kretanjem ose giroskopa u odnosu na pravac precesije, koji se