

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Stanislav Jurečka

Laserové metody separácie izotopov

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 31 (1986), No. 4, 203--207

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138888>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1986

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Laserové metódy separácie izotopov

Stanislav Jurečka, Liptovský Mikuláš

1. Úvod

Rastúca potreba izotopicky čistých látok pre vedecké výskumy, medicínu, chemický priemysel, spektroskopiu, radiačnú chronológiu a mnohé ďalšie odvetvia podnecuje celý komplex výskumov v oblasti separácie izotopov.

Z celého súboru prác týkajúcich sa separácie izotopov môžeme vyčleniť dva prístupy k riešeniu tejto otázky. V prvom prípade sa sleduje priebeh procesov, pri ktorých sa prejavujú odlišnosti v niektorých fyzikálno-chemických vlastnostiach izotopov. Tieto tradičné metódy využívajú difúzne procesy, destiláciu, elektrolýzu, elektromagnetické procesy, chemické reakcie izotopickej výmeny a pod. [1]. V jednom cykle separačného procesu tieto metódy dávajú nízke obohatenie, pretože fyzikálne a chemické vlastnosti izotopov sú veľmi podobné. V druhom prípade sa dnes študuje možnosť separácie izotopov prostredníctvom interakcií látky a laserového žiarenia. Výhodou laserových metód v porovnaní s tradičnými je možnosť excitácie jedinej zložky izotopovej zmesi s vysokou selektívnosťou.

Veľká pozornosť sa spočiatku venovala využitiu procesov nerezonančnej interakcie intenzívnych svetelných tokov s látkou ako v kontinuálnom, tak aj v impulznom režime. Pri nerezonančnej interakcii sa vzbudený atóm ionizuje doplnujúcim laserovým impulzom (laserové zváranie, termojadrová syntéza a pod.). Pri rezonančnej interakcii atómov a molekúl s laserovým žiarením vzniká koherentná superpozícia ich kvantových stavov a to vedie k vzniku špecifických nestacionárnych javov, ktoré možno využiť pri separácii izotopov.

Rezonančná interakcia intenzívneho laserového žiarenia s látkou dáva možnosť selektívne ovplyvňovať atómy, ióny, molekuly, ba celé molekulové komplexy. Laserová separácia izotopov využíva rozdielnosti v absorpčných spektrách atómov, molekúl a pod., vyvolané ich izotopickým zložením. Energetické hladiny sú pre izotopy daného atómu posunuté (izotopický zdvih). Môžeme však vybrať postupnosť kvantových prechodov daného izotopu a ten selektívne excitovať (obr. 1).

Laserové žiarenie taktó umožňuje rozvinúť celý rad metód – separáciu izotopov svetelným tlakom [2–4], selektívne stimulovanie chemických reakcií [5–7], dvojstupeňovú fotoionizáciu atómov a molekúl [8], fotodisociáciu [9] a mnohé iné.

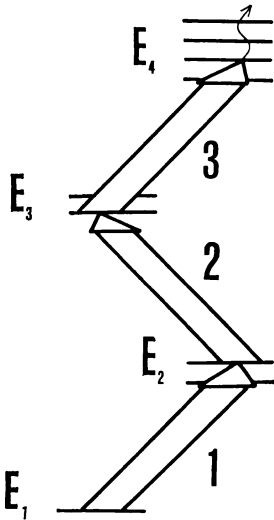
2. Metódy laserovej separácie izotopov

Pre všetky laserové metódy separácie izotopov je príznačné selektívne vzbudenie príslušnej izotopovej komponenty dostatočne monochromatickým a intenzívnym laserovým žiarením s následným fyzikálnym oddelením excitovaných izotopov. Konkrétne

metódy laserovej separácie sa líšia v tom, aký fyzikálny, chemický alebo plazmochemický proces interakcie vzbudených častíc zvolíme pre ich separáciu.

Dôležité sú tiež rozdiely v objektoch separácie. Napr. spektrá atómov s výrazným izotopickým zdvihom, obvyčajne prekrývajúcej dopplerovskú šírku čiar, sú vhodné pre rezonančnú interakciu. Dopplerovské rozšírenie absorpčnej čiary spôsobené vzájomnými zrážkami separovaných častíc znižuje selektivnosť interakcie.

Selektivnosť vplyvu laserového žiarenia je najlepšie využitá pri interakcii s lúčom vzájomne nepôsobiacich atómov alebo molekúl. Účinnosť separácie možno zvýšiť prevedením separovaných objektov do plynnej fázy.



Obr. 1. Selektívne trojstupňové vzbudenie atómov s využitím izotopického zdvihy na každom stupni

Izotopický zdvih možno využiť len použitím dostatočne monochromatického laserového žiarenia na každom stupni (1, 2, 3). E_k sú energetické hladiny príslušného izotopu.

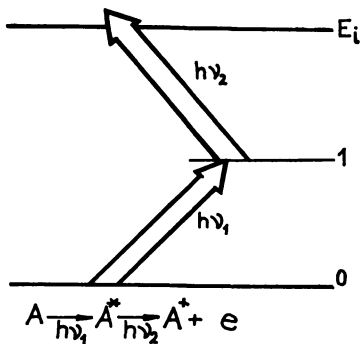
Metódy laserovej separácie izotopov sa líšia aj tým, či sú využité jednostupňové alebo viacstupňové procesy vzbudení. Pri jednostupňových procesoch jeden fotón laserového žiarenia selektívne excituje jednu energetickú hladinu atómu alebo molekuly. Na oddelenie príslušného izotopu sa potom použije interakcia selektívne vzbudeného stavu s fyzikálnym alebo chemickým agentom. Môže byť použitý rozptyl lúča excitovaných častíc na podobných, ale nevzbudených časticiach, rozptyl v silnom poli rezonančnej stojatej vlny, odklon lúča vibračne excitovaných molekúl nehomogénnym elektrickým poľom, heterogénne rozdelenie vibračne excitovaných molekúl a pod. [10]. Jednostupňová excitácia je vhodná hlavne pre atómy.

Pri mnohustupňových procesoch sa na excitáciu častíc na dostatočne vysokú energetickú hladinu a zmenu ich stavu alebo fyzikálnych vlastností používa niekoľko kvánt žiarenia. Pre atómy je zvlášť významná dvojstupňová fotoionizácia, úspešne používaná pri separácii izotopov uránu [11]. V prípade molekúl sa s úspechom využíva dvojstupňová selektívna fotodisociácia. Jej využitie na separáciu izotopov dusíka opisuje Ambarcumjan [9]. Hoci sú viacstupňové procesy vhodné zvlášť pre molekuly s dobre zvýrazneným izotopickým zdvihom, treba vidieť, že laserové žiarenie možno najefektívnejšie využiť v jednostupňových procesoch.

V ďalšom ilustrujem laserové separačné postupy na dvoch, dnes už rozpracovaných metódach – metóde selektívnej fotoionizácie atómov a metóde fotodisociácie molekúl.

3. Selektívna fotoionizácia atómov

Farbivé lasery dnes umožňujú meniť spojite vlnovú dĺžku žiarenia, preto sú veľmi vhodné pre dvojestupňovú fotoionizáciu atómov (obr. 2). V tomto prípade jedna z rezonančných absorpčných čiar spektra atómu je excitovaná dostatočne monochromatickým laserom a vzbudené atómy sú ionizované žiarením ďalšieho lasera alebo nekoherentného zdroja. Energeticky najslabším miestom pritom je druhý stupeň – fotoionizácia vzbudeného stavu atómu, čo je podmienené malou hodnotou ionizačného účinného prierezu σ_2 vzbudeného stavu [12]. Výsledky dosiahnuté pre atómový lúč s priečnym rozmerom rádovo cm svedčia o možnosti úplne separovať potrebný izotop zo zmesi, pri laserovom výkone rádovo watt pre prvý a kilowatt pre druhý stupeň [10].

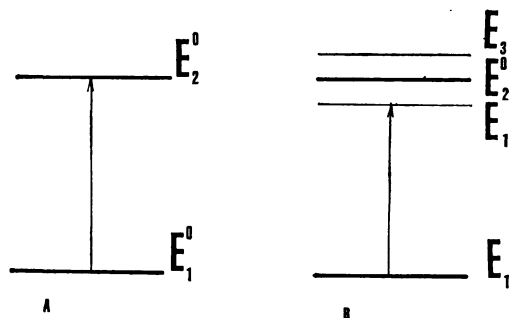


Obr. 2. Dvojestupňová fotoionizácia atómov.

0, 1 – energetické hladiny,
 E_i – ionizačná energia
 $h\nu_k$ – energia kvanta laserového žiarenia s frekvenciou ν_k ,
 h je Planckova konštanta
 A – nuklid,
 e – elektrón.

Obr. 3. Rozštiepenie hladiny $n = 2$ atómu vodíka v elektrickom poli.

A – bez prítomnosti elektrického poľa,
 B – v elektrickom poli,
 E_k – energetické hladiny.



Priamym zovšeobecnením metódy dvojestupňovej fotoionizácie je N -stupňová, v ktorej sa viacerými laserami dosahuje postupné rezonančné vzbudenie atómu na energetickú hladinu blízku kontinuu. Ionizácia sa potom uskutočňuje napr. infračerveným laserom.

Výhodné môže byť tiež využitie ionizácie selektívne excitovaných atómov v silnom elektrostatickom poli deformujúcom ich elektrónový obal [13] (obr. 3).

Selektívna ionizácia atómov je možná, ak sa atómy excitujú tesne pod hranicu ionizácie a ak potom nasleduje ionizácia takýchto vysokovzbudených atómov vonkajším elektrickým poľom. Laserové žiarenie umožňuje s vysokou efektívnosťou obsadiť stavy atómu s veľkými hodnotami hlavného kvantového čísla n . Elektrické pole mení elektrónové termy tak, že časť hladín diskretneho spektra blízko pri hranici ionizácie sa presúva do kontinua a ostatné hladiny sú ionizované. Pre dosiahnutie efektívneho obsadenia stavov s veľkým n sú potrebné 3–4 lasery, takže táto metóda pripomína N -stupňovú fotoionizáciu. Na ionizáciu atómov sa na rozdiel od fotoionizácie laserovým žiarením používa ľahko dostupné elektrické pole. Napríklad pre atóm rubídia toto pole nemusí prevyšovať 30 kV/cm [13]

Samoionizácia vysokovzbudených stavov atómu v elektrickom poli bola overená na atómoch vodíka [14]. Výsledky, ktoré uvádzajú Ivanov a Letochov poukázali aj na ďalšie rozšírenie oblasti využitia metódy selektívnej fotoionizácie atómov [13].

Spomínané metódy selektívnej separácie izotopov prekonávajú základný problém dvojstupňovej fotoionizácie – malú hodnotu účinného prierezu σ_2 a využívajú proces jednoduchý. Metódou selektívnej dvojstupňovej fotoionizácie sa dosiahlo štvornásobné obohatenie prírodného uránu izotopom ^{235}U s výťažkom 1 mg obohatenej látky za hodinu [15].

Uvádzané metódy sú univerzálne, môžu byť použité pre separáciu ľubovoľného izotopu.

4. Selektívna disociácia molekúl

Všeobecnou metódou selektívnej disociácie molekúl je dvojstupňová selektívna fotodisociácia. Táto metóda je analogická dvojstupňovej fotoionizácii atómov. Molekuly rezonančne absorbujú laserové žiarenie a súčasne sú ožarované viditeľným alebo ultrafialovým svetlom, ktorého energia je vhodná na fotodisociáciu vzbudeného vibračného stavu a nestačí na fotodisociáciu základného vibračného stavu [12]. Pre fotodisociáciu sú najvhodnejšími zdrojmi žiarenia lasery zodpovedajúcej vlnovej dĺžky. Nedostatky tejto metódy sú rovnako ako v prípade fotoionizácie atómov spojené s rozdielnymi účinnými prierezmi rezonančnej absorpcie a disociácie, čo sťažuje plné využitie fotónov rôznych vlnových dĺžok.

5. Záver

Rozpracovávanie nových metód separácie izotopov je podmienené potrebou vysokej efektívnosti separácie, ktorú v porovnaní s tradičnými metódami opísané metódy poskytujú. Napríklad pre izotop síry ^{32}S sa použitím CO_2 impulzného lasera dosiahlo tisícásobné zvýšenie obsahu tohoto izotopu vo vzorke [16].

Treba poznamenať, že pri separácii izotopov je pri výbere podmienok separačného procesu dôležitá otázka vysokej produktívnosti a vysokého stupňa separácie. Pre zvýšenie produktívnosti je nevyhnutné zvýšiť tlak plynu, v ktorom prebieha separácia.

To platí všeobecne aj pre klasické separačné metódy. Problematikou vplyvu zmeny tlaku v iónovom zdroji na separabilnosť izotopov hmotnostným spektrometrom sa zaoberá Kecskés v práci [17]. Zvýšením tlaku sa prejavujú dopplerovské poruchy spektrálnych čiar a urýchľuje sa odovzdávanie energie excitácie nežiadúcim molekulám. Stupeň separácie izotopov v reakciách vibračne vzbudených molekúl exponenciálne rastie s rastom aktivačnej energie, no absolútna rýchlosť reakcie pritom exponenciálne klesá [18]. Preto treba voliť aj podmienky príslušných separačných procesov v závislosti od požiadaviek na výsledok separácie.

Výhody laserových metód separácie izotopov sú značné; tomu nasvedčujú výsledky celého radu experimentov. Izotopická čistota materiálov je dnes už častou požiadavkou technickej praxe [19]. Veľmi čisté materiály sú samozrejmom požiadavkou jadrovej energetiky, elektroniky a mikroelektroniky. Čisté izotopy rádioaktívnych prvkov sa používajú aj v meteorológii ako stopovacie elementy. Schopnosť merať ultranízke prímеси nuklidov v prírodných aj antropogénnych vzorkách (nuklidy vznikajúce v dôsledku ľudskej činnosti) je základnou potrebou aj radiačnej chronometrie pri datovaní skúmanej vzorky pomocou rádioaktívnych izotopov [20]. Naliehavá potreba citlivých metód a potenciálne možnosti metód laserovej separácie dávajú perspektívy rozvoju laserovej spektroskopie, využívajúcej nelineárne optické javy na skúmanie vlastností látok.

Literatúra

- [1] ŠEMLJA, M.; PERIE, Ž.: *Razdelenie izotopov*. Atomizdat, Moskva 1980.
- [2] KAZANCEV, A. P.; SURDUTOVIČ, G. I.: *Pisma v ŽETF*, 21 (1975), 376.
- [3] BERNHARDT, A. F.; DUERRE, D. E.; SIMPSON, J. R.; WOOD, L. L.: *Opt. Comm.* 16 (1976), 196.
- [4] BERNHARDT, A. F.: *Appl. Phys.* 9 (1976), 19.
- [5] YU, M. H.; LEVY, M. R.; WITTIG, C.: *J. Chem. Phys.* 72 (1980) 3789.
- [6] CAMPBELL, J. D.; YU, M. H.; WITTIG, C.: *Appl. Phys. Lett.* 32 (1978), 413.
- [7] STEINFELD, H.: *Inducirujemyje lazerom chimičeskije procesy*. Mir, Moskva, 1984.
- [8] SNAVELY, B. B.: *IEEE J. Quantum Electron.* QE-10, 771 (1974).
- [9] AMBARCUMJAN, R. V.; LETOCHOV, V. S.; MAKAROV, G. N.; PURECKIJ, A. A.: *Pisma v ŽETF*. 17 (1973), 91.
- [10] KARLOV, N. V.; PROCHOROV, A. M.: *Uspechi fiz. nauk* 118 (1976), 583.
- [11] TUCCIO, S. A.; DUBRIN, J. W.; PETERSON, O. G.; SNAVELY, B. B.: *IEEE J. Quantum Electron*, 10 (1974), 790.
- [12] SMIRNOV, B. M.: *Atomnyje stolknovenia i elementarnyje procesy v plazme*. Atomizdat, Moskva, 1968.
- [13] IVANOV, L. N.; LETOCHOV, V. S.: *Kvant. elektron.* 2 (1975), 585.
- [14] AMBARCUMJAN, R. V.; BEKOV, G. I.; LETOCHOV, V. S.; MAKAROV, G. N.: *Pisma v ŽETF*. 22 (1975), 96.
- [15] AMBARCUMJAN, R. V.; BEKOV, G. I.; LETOCHOV, V. S.; MIŠIN, V. I.: *Pisma v ŽETF*. 21 (1976), 595.
- [16] BASOV, N. G. a ďal.: *Uspechi fiz. nauk* 121 (1977) 442.
- [17] KECSKÉS, A.: *Zborník Ped. fak. v Nitre*, 27, SPN, Bratislava 1977, 213—232.
- [18] AMBARCUMJAN, R. V. a ďal.: *Pisma v ŽETF*. 21 (1975), 375.
- [19] KRAPUCHIN, V. V.; SOKOLOV, I. A.; KUZNECOV, G. D.: *Fiziko-chimičeskije osnovy tehnologij poluprovodnikovych materialov*. Metallurgija, Moskva, 1982.
- [20] CHRAPAN, J.: *Radiačná chronológia*. Alfa, Bratislava, 1974.