

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

N. G. Basov; A. M. Prochorov  
Molekulární generátory a zesilovače

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 4 (1959), No. 4, 439--448

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137745>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1959

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>

## MOLEKULÁRNÍ GENERÁTORY A ZESILOVAČE\*)

Doktor fys. a mat. věd N. G. BASOV, doktor fys. a mat. věd A. M. PROCHOROV  
*Fyzikální ústav P. N. Lebeděva Akademie věd SSSR (Moskva).*

Během posledních pěti let se objevily nové metody buzení a zesílení elektromagnetických vln, založené na rezonančním vyzařování vzbuzených molekul. Tyto metody byly nezávisle na sobě vypracovány ve Fyzikálním ústavu P. N. Lebeděva Akademie věd SSSR (N. G. Basov a A. M. Prochorov) a na Kolumbijské universitě v USA (Gordon, Caiger a Towns).

Níže publikovaná stať je věnována těmto pracím, které nyní našly široké uplatnění v celé řadě vědních oborů.

### Některé otázky teorie molekulárních generátorů a zesilovačů

U metod buzení a zesílení rádiových vln, které jsou založeny na použití elektronových zařízení, se využívá energie postupného pohybu elektronů. V nových zařízeních pro buzení elektromagnetických kmitů má hlavní úlohu energie, podmíněná vnitřním pohybem atomů nebo molekul.<sup>1)</sup> Obvykle je vnitřní energie částic kvantovaná a proto analýza funkce nových přístrojů, tak zvaných molekulárních generátorů a zesilovačů nemůže být provedena na základě klasické elektrodynamiky, nýbrž je zapotřebí použít zákonů kvantové mechaniky.

Zvláštěností molekulárních generátorů je mimořádně vysoká stabilita frekvence záření; frekvence je v podstatě určena vnitřními parametry molekul. Proto je možno pomocí molekulárních generátorů vytvořit molekulární normály frekvence o velké přesnosti. Pro nové zesilovače je charakteristická nízká hladina šumů, což umožňuje značně zvýšit citlivost přijímací aparatury.

V současné době se tyto přístroje v mnoha zemích vyvíjejí a hledají se metody jejich použití v různých oblastech vědy a techniky (molekulární normály, molekulární hodiny, spektroskopy o velké rozlišovací schopnosti, radionavigační přístroje, zesilovače pro radioteleskopy a radiolokační zařízení, buzení a zesílení milimetrových a submilimetrových vln atd.). Byly uveřejněny desítky stať věnované teorii, konstrukci a použití nových přístrojů.

V řadě prací (Blombergen, Skobel, Strandberg aj.) byla využita pro zesílení a buzení centimilimetrových vln paramagnetická resonance, kterou objevil sovětský vědec E. K. Zavojskij. Molekulární zesilovače tohoto typu jsou velmi praktické, protože jejich frekvence může být snadno změněna změnou vnějšího magnetického pole.

*Fyzikální základy principu molekulárního buzení.* Podle představ kvantové mechaniky neprobíhá změna energie molekul nebo atomů spojitě, nýbrž skokem; jinými slovy řečeno — existují určité hodnoty energie, neboli energetické hladiny, na kterých se může nacházet daná atomová nebo molekulární soustava. Při přechodu molekul nebo atomů z jedné hladiny na jinou je vyzářen nebo pohlcen foton, jehož frekvence  $\nu$  se rovná:

\*) Н. Г. Басов, доктор физ.-мат. наук, А. М. Прохоров, доктор физ.-мат. наук, *Молекулярные генераторы и усилители*, Природа, 1958, č. 7.

<sup>1)</sup> V r. 1940 upozornil V. A. Fabrikant na možnost záporné absorpce v oboru světelných vln při výboji v plynech. Viz sborník *Elektronové a iontové přístroje*, redaktor N. V. Timofějev, Gosenergoizdat, 1940 (pozn. redakce).

$$\nu = \frac{E_{\text{horní}} - E_{\text{dolní}}}{h}, \quad (1)$$

kde  $E_{\text{horní}}$  je energie horní hladiny,  $E_{\text{dolní}}$  je energie dolní hladiny,  $h = 6,62 \cdot 10^{-27}$  erg . sek. je Planckova konstanta.

Rozebereme vzájemné působení molekul s vnějším elektromagnetickým polem. Předpokládejme, že každá ze zkoumaných molekul má elektrický dipolový moment  $d$ . Tím budou molekuly a vnější elektromagnetické pole na sebe vzájemně působit. Jestliže frekvence pole splňuje podmínku (1), vzniká rezonance a působením pole dojde k přechodu molekul s horní hladiny na dolní a naopak. Obvykle má molekulární soustava velký počet různých hladin. Při přechodech molekul s jedné hladiny na druhou je vyzářen nebo pohlcen foton o určité frekvenci. Studujeme-li tuto frekvenci, můžeme pozorovat dvě hladiny (horní a spodní), které odpovídají této frekvenci.

Předpokládejme, že daná molekula je na počátku na horní hladině; pod vlivem vnějšího pole může vyzářit kvantum energie a přejít na nižší hladinu. Tento děj se nazývá indukční (rezonanční, vzbuzené) vyzařování a je spojen se zvětšením energie pole na úkor vnitřní energie molekul. Když naopak je molekula na dolní hladině, může pohltit kvantum energie a přejít na horní hladinu. Tento děj se nazývá rezonanční pohlcování a je spojen se zmenšením energie pole. Pravděpodobnost obou procesů je stejná a je úměrná hustotě energie pole.

Rozebereme nyní vztah mezi vnějším polem a soustavou molekul, které se nacházejí v tepelné rovnováze. Tepelným pohybem narážejí molekuly na sebe a na stěny nádoby a dochází k přechodům molekul s jedné hladiny na druhou. Následkem tepelného pohybu dochází k rozdělení molekul podle hladin, při čemž na horní hladině se nachází menší počet molekul než na dolní. Pro oblast frekvencí, která nás zajímá, je energie tepelného pohybu, která je dána veličinou  $kT$  ( $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$  erg/grad — Boltzmannova konstanta,  $T$  — absolutní teplota) značně větší než rozdíl energií mezi zkoumanými hladinami, tj.

$$\frac{h\nu}{kT} \ll 1. \quad (2)$$

Skutečně, jestliže  $\nu = 3 \cdot 10^{10}$  c/sec (délka vlny se rovná 1 cm) a  $T = 300$  °K (27 °C), pak  $h\nu/kT \approx 0,005$ .

Dále je možno dokázat, že v těchto podmínkách

$$\frac{N_{\text{dolní}} - N_{\text{horní}}}{N_{\text{dolní}}} = \frac{h\nu}{kT}, \quad (3)$$

kde  $N_{\text{dolní}}$  a  $N_{\text{horní}}$  jsou příslušné počty molekul na dolní a horní hladině. Proto není rozdíl koncentrací molekul na obou hladinách velký, avšak přesto budou převládat případy pohlcování (kterých se účastní „dolní“ molekuly) nad případy vyzařování (kterých se účastní „horní“ molekuly). Proto u soustavy ve stavu termodynamické rovnováhy bude docházet k *pohlcování* energie vnějšího pole.

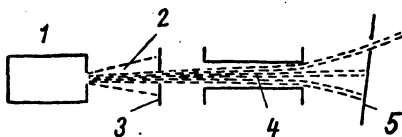
Počet fotonů, který soustava pohltí, se bude rovnat rozdílu mezi počtem přechodů molekul z dolní hladiny na horní a mezi počtem zpětných přechodů. Pohlcení fotonů způsobí porušení tepelné rovnováhy plynu, tj. zvýšení počtu molekul na horní hladině. Srážky mezi molekulami budou obnovovat naruše-

nou rovnováhu; při čemž energie fotonů prakticky úplně přejde do energie postupného pohybu molekul, tj. zvýší teplotu plynu.

Je-li střední doba mezi přechody molekuly z hladiny na hladinu větší než střední doba mezi srážkami (slabé pole), pak se tepelná rovnováha porušuje málo a počet pohlcených fotonů bude úměrný intenzitě záření. Jestliže střední doba přechodu molekuly z hladiny na hladinu je menší než střední doba mezi srážkami molekul (silné pole), pak nastane velké porušení tepelné rovnováhy. Další zvětšování vnějšího pole od určitého stavu už nebude zvyšovat absorpci. Tento efekt se nazývá efekt nasycení. Při velkém nasycení, (tj. při dostatečně silném poli) se počet molekul na horní a dolní hladině vyrovnává a počet pohlcených fotonů za jednotku času je určen počtem srážek mezi molekulami za tuto dobu a není závislý na vnějším poli.

Proto plyn v tepelné rovnováze může působením vnějšího pole energii jenom pohlcovat, ale nemůže ji vyzářovat. Aby mohla molekulární soustava vlivem vnějšího pole vyzářovat energii, je nutno porušit tepelnou rovnováhu tak, aby počet molekul na horní hladině byl větší než počet molekul na dolní hladině. Rozdíl mezi počtem molekul na horní a dolní hladině nazveme počtem aktivních molekul. Jestliže je v molekulární soustavě počet aktivních molekul kladný, pak může soustava vyzářovat energii působením vnějšího elektromagnetického pole.

Popíšeme nyní metodu získání aktivních molekul pomocí „molekulárního svazku“. Předpokládejme, že zkoumaný plyn je uzavřen do určitého objemu o tlaku několika milimetrů rtuťového sloupce. Jestliže tento plyn vypouštíme do vakua otvorem o malém průměru, vytvoří unikající molekuly molekulární svazek, ve kterém nedochází k vzájemným srážkám molekul. Abychom získali molekulární svazek, musí být průměr otvoru menší než volná dráha molekul plynu (při tlaku plynu okolo 1 mm rtuťového sloupce musí být rozměry otvorů řádu 0,01 mm). Intenzita svazku může být podstatně zvýšena, použijeme-li řady malých otvorů. Molekuly unikají z otvoru pod různými úhly, při čemž maximální počet jich uniká v ose otvoru. Abychom dostali dostatečně úzký svazek molekul, omezujeme svazek clonou (obr. 1).



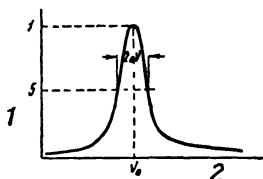
Obr. 1. Schéma třídění molekul. 1 — Zdroj molekulárního svazku, 2 — Molekulární svazek, 3 — Clona, 4 — Nehomogenní elektrické nebo magnetické pole, 5 — Clona.

Síly působící na molekuly v nehomogenním elektromagnetickém nebo magnetickém poli závisí na hladině (stavu), na kterém se nacházejí molekuly<sup>2)</sup>. Prochází-li svazek nehomogenním polem, odchýlí se různě molekuly, které jsou v různých hladinách. Vymezíme-li clonou jenom ty molekuly, které jsou vychýleny do určitého směru, získáme *svazek aktivních molekul*, který je na určité (např. horní) hladině.

Takový svazek je již schopen vyzářovat energii působením vnějšího pole. Pole, potřebné pro indukování záření zase můžeme získat z energie, která je vyzářena molekulami svazku. Na tom je založen princip molekulárního generátoru.

<sup>2)</sup> K takovému vzájemnému působení dochází tehdy, jestliže molekuly mají elektrický (nebo magnetický) dipólový moment.

V molekulárním generátoru prochází svazek aktivních molekul dutinovým resonátorem<sup>3)</sup>, který je naladěný na frekvenci záření molekul. V tomto případě mohou být vybudeny elektromagnetické kmity na úkor energie, kterou vyzářují molekuly svazku. Jestliže je amplituda kmitů v resonátoru dostatečně velká, pak počet molekul na obou hladinách se stane stejným (jako při efektu nasycení), poněvadž polovina molekul, vyzářivších energii, přejde z horní hladiny na dolní. Jestliže tato energie stačí kompenzovat ztráty, bude se v dutinovém resonátoru neustále udržovat určitá amplituda kmitů. Frekvence vznikajících kmitů bude v podstatě určena frekvencí přechodu molekul<sup>4)</sup>, a proto molekulární generátor má vysokou stabilitu frekvence.



Obr. 2. Schematické znázornění spektrální čáry záření. 1 — Intenzita, 2 — Frekvence.

„*Monochromie*“ kmitů generátoru. Ještě jsme nerozebrali otázky, spojené se šíří spektrální čáry a s vlivem této šíře na funkci molekulárního generátoru. Tím, že šíře spektrální čáry je konečná, jsou přechody s hladiny na hladinu pozorovány nejen při jedné zvolené frekvenci  $\nu_0$ , nýbrž s menší intenzitou i v určitém okolí této frekvence. Zůstává-li amplituda pole stálá a změníme-li frekvenci o  $\Delta\nu$  tak, že intenzita přechodů nám právě klesne na polovinu, pak  $\Delta\nu$  je polovina šířky spektrální čáry (obr. 2). Šíře čáry je ovlivňována dvěma příčinami. Za první, třebaže molekuly plynu jsou ve své podstatě totožné, mohou mít poněkud různé vlastní frekvence buď následkem vzájemného působení molekul, nebo následkem různé rychlosti postupného pohybu (Dopplerův efekt). Druhou příčinou rozšíření čar je konečná doba vzájemného působení mezi molekulami a polem záření. Z teorie vlnění je známo, že sinusové kmity s frekvencí  $\nu$ , která trvá po dobu  $\Delta t$ , nejsou vlnění čistě harmonická, nýbrž představují sumu velkého počtu sinusoid, trvajících nekonečně dlouhou dobu s frekvencemi, které leží v intervalu  $\Delta\nu$ , který vyhovuje podmínce  $2\pi\Delta\nu\Delta t \sim 1$ . Proto jestliže molekuly vzájemně působí s polem během doby  $\Delta t$ , pološíře spektrální čáry bude řádu

$$\Delta\nu = \frac{1}{2\pi\Delta t} \quad (4)$$

Doba vzájemného působení mezi molekulami a polem záření je ukončena srážkami molekul mezi sebou nebo se stěnami nádoby. Při tom veličina  $\Delta t$  je doba mezi srážkami molekul nebo (v případě molekulárního svazku, kde jsou srážky mezi molekulami vyloučeny) doba průletu molekul resonátorem. Polovina šíře spektrální čáry, určené touto příčinou, se pro molekulární svazek rovná:

$$\Delta\nu = \frac{1}{2\pi\Delta t} = \frac{v}{2\pi l} \quad (5)$$

kde  $v$  je rychlost molekul a  $l$  délka resonátoru.

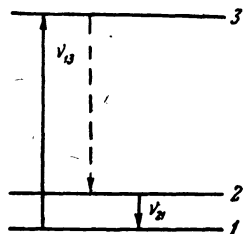
<sup>3)</sup> Dutinový resonátor je dutina, ohraničená kovovými stěnami, ve které mohou být budeny elektromagnetické kmity. Frekvence kmitů závisí na rozměrech dutiny. Resonátor se používá pro obor vysokých frekvencí a nahrazuje oscilační obvod pro obor nízkých frekvencí, který se skládá z cívky a kondensátoru.

<sup>4)</sup> Frekvence ustálených kmitů bude také záviset na tom, jak přesně souhlasí frekvence resonátoru se spektrální frekvencí zkoumaného předmětu.

Čím menší je šířka spektrální čáry, tím menší vliv na frekvenci kmitů má naladění dutinového rezonátoru. Předpokládejme, že polovina šíře rezonanční křivky dutinového rezonátoru se rovná  $\Delta\nu_p$ . Jestliže přeměníme vlastní frekvenci dutinového rezonátoru o veličinu  $\Delta\nu_p$  (na začátku byl rezonátor přesně naladěn na frekvenci spektrální čáry), pak se frekvence molekulárního generátoru změní o veličinu  $\Delta\nu$ , která je o mnoho menší než  $\Delta\nu_p$ .

Zkušenost i teorie dále ukazují na vysoký stupeň monochromie kmitů molekulárního generátoru. Kolísání frekvence molekulárního generátoru při frekvenci  $\nu_0 = 23870,13$  Mc/sec leží v rozmezí  $0,003 \pm 0,0003$  c/sec.

*O molekulárním zesilovači.* Nejsou-li splněny podmínky samobuzení v molekulárním generátoru, tj. výkon dodávaný molekulami není dostatečný pro kompensaci ztrát dutinového rezonátoru, může přístroj sloužit jako zesilovač. Jestliže je do rezonátoru přivedena elektromagnetická energie o frekvenci blízké k frekvenci spektrální čáry, probíhá rezonanční vyzářování aktivních molekul a výkon v rezonátoru se zvětšuje. Takový zesilovač je analogický s regenerativním elektronkovým zesilovačem. Funkci elektrony zde zastávají aktivní molekuly<sup>5</sup>).



Obr. 3. Schéma energetických hladin částic při jejich třídění pomocným vysokofrekvenčním polem.

Molekulární zesilovače mají velmi vysokou citlivost; pomocí nich lze zachytit rádiové signály v centimetrovém rozsahu vln o  $10^3$ krát menším výkonu než signály, které přijímají superheterodynové radiolokační přijímače.

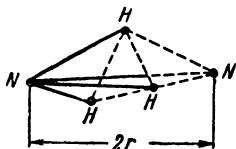
*Třídění molekul pomocí pomocného vysokofrekvenčního pole.* Kromě výše popsaného způsobu třídění molekul v molekulárním svazku je možno získat aktivní molekuly i jiným způsobem — metodou pomocného střídavého vysokofrekvenčního pole. První způsob je používán u plynů a druhý způsob je výhodnější u tuhých těles.

Rozebereme molekulární soustavu, která má tři energetické hladiny, mezi nimiž může docházet k přechodům (obr. 3). Předpokládejme, že frekvence  $\nu_{13}$  je značně větší než frekvence  $\nu_{12}$ . Ve stavu tepelné rovnováhy na nižších energetických hladinách se jako obvykle nachází větší počet molekul než na vyšších hladinách. Jestliže na takovou soustavu působí vnější střídavé pole o frekvenci  $\nu_{13}$  a s takovou intenzitou, že dosáhneme efektu nasycení, pak počet molekul na hladině 1 a 3 se vyrovná. Počet molekul na hladině 1 se přitom samozřejmě zmenší. Jestliže hladina 3 je dostatečně vzdálena od hladiny 1 a 2, pak při nasycení může být více molekul na hladině 2 než na hladině 1. Následkem toho bude mít soustava kladný počet aktivních molekul, takže může být použita pro buzení nebo zesílení elektromagnetických kmitů při frekvenci  $\nu_{13}$ . V uvedeném příkladě jsme pro větší jednoduchost předpokládali, že doba života molekul je pro všechny hladiny stejná. V některých případech může být doba života molekul na různých hladinách různá.

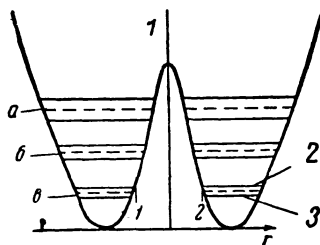
<sup>5</sup>) Propustné pásmo molekulárního zesilovače je určeno šíří spektrální čáry, při čemž toto propustné pásmo se zmenšuje s růstem koeficientu zesílení, jak je tomu u obvyklých regenerativních přijímačů. Při koeficientu zesílení větším než jedna je šíře propustného pásma menší než šířka spektrální čáry.

## Molekulární generátor se svazkem čpavkových molekul

*Spektrum molekul čpavku a třídění svazku molekul podle inverzních hladin.* Molekula čpavku má jehlanovou strukturu (obr. 4). Potenciální energie molekuly, jako funkce vzdálenosti atomu dusíku vzhledem k rovině, která prochází přes atomy vodíku, je zobrazena na obr. 5. Rovnovážný stav atomů vodíku odpovídá minimu na křivce potenciální energie. Zvětší-li se tato vzdálenost, bude atom dusíku přitahován k atomům vodíku; zmenší-li se vzdálenost, bude atom odpuzován. Molekula čpavku není tedy tuhá, ale atomy uvnitř ní jsou spojeny „pružnými silami“. Tím mohou v molekule vznikat kmitavé pohyby atomu dusíku vůči atomům vodíku. Energie těchto kmitů je jako obvykle kvantovaná. Hodnoty energie jsou zobrazeny na křivce potenciální energie čárkovaně.



Obr. 4. Struktura molekul čpavku.



Obr. 5. Závislost potenciální energie molekul čpavku na změně vzdálenosti mezi atomy dusíku a rovinou atomů vodíku. 1 – Energie, 2 – Horní inverzní hladina, 3 – Dolní inverzní hladina.

Podle zákonů klasické mechaniky nemůže atom dusíku projít rovinou tvořenou jádry vodíku, protože uvnitř oblasti 1, 2 (viz obr. 5) je kinetická energie molekuly záporná. Kvantová mechanika připouští, že existuje určitá pravděpodobnost, že atom dusíku projde rovinou jader vodíku a octne se v protilehlém „potenciálním minimu“<sup>6)</sup>. Molekula, vzniklá tímto průchodem atomu dusíku rovinou atomů vodíku, je zrcadlovým obrazem výchozí molekuly vzhledem k rovině atomů vodíku. Následkem popsání efektu se každá z hladin energie kmitů rozděluje na dvě hladiny, které se nazývají inverzní hladiny.

Kromě kmitavého pohybu může molekula čpavku konat i pohyb rotační. Energie rotačního pohybu je také kvantovaná, tj. rychlost rotace molekuly může nabývat jen přísně určených hodnot.

Základní frekvence pro přechod mezi inverzními hladinami odpovídá frekvenčnímu rozsahu rádiových vln, ale přesná frekvence tohoto přechodu je závislá na rotačním pohybu molekul. To je podmíněno tím, že při rotaci se odstředivým zrychlením molekula roztahuje, a to vede ke změně potenciálního valu.

Tedy pro každou rychlost rotace molekul existuje určitá frekvence inverzního přechodu.

Vzdálenost mezi sousedními inverzními hladinami tudíž závisí na frekvenci kmitů molekuly a na energii její rotace. Základní (dolní) kmitové hladiny,

<sup>6)</sup> O otázce průchodu přes potenciální val viz stať E. S. Gernsteina „Katalýza jaderných reakcí“, Příroda, 1958, č. 4, str. 13–20.

spadají do oboru vlnových délek o 1–2 cm při vzdálenosti mezi sousedními inverzními hladinami pro různé hodnoty energie rotace.

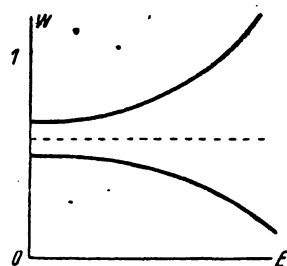
Na třídění molekul čpavku podle inverzních hladin se používá tzv. elektrický čtyřpólový kondensátor. Funkce tohoto kondensátoru se zakládá na tom, že při vniknutí molekul plynu do vnějšího nehomogenního elektrického pole se energie horní inverzní úrovně zvětšuje, kdežto energie spodní úrovně se zmenšuje (obr. 6).

Řez kondensátorem je na obr. 7. Čtyřpólový kondensátor, která má čtyři elektrody, je sestaven tak, že elektrické pole na jeho ose se rovná nule a se vzdáleností od osy pole vzrůstá. Přivedeme-li do kondensátoru molekuly čpavku, pak molekuly, které jsou na horní inverzní hladině, se budou přitahovat k ose kondensátoru,

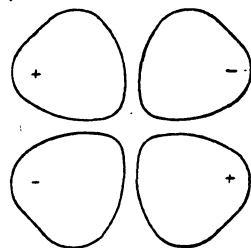
kde jejich energie vzájemného působení s elektrickým polem bude minimální. Molekuly na dolní inverzní hladině se budou přitahovat k okraji kondensátoru, tj. do prostoru s maximálním elektrickým polem, kde zase ony mají minimální potenciální energii. Procházejí-li tedy svazek molekul čpavku přes čtyřpólový kondensátor, počnou

molekuly na horní hladině kmitat v prostoru kolem osy kondensátoru, kdežto molekuly na dolní hladině budou narážet na elektrody kondensátoru a vylučovat se ze svazku. Proto na výstupu čtyřpólového kondensátoru získáváme svazek molekul, které jsou převážně na horní inverzní hladině, tj. svazek aktivních molekul, které jsou schopny vyzařovat energii.

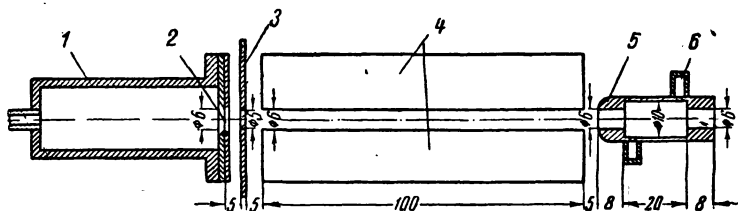
*Konstrukce molekulárního generátoru.* Přístroj se skládá ze tří hlavních částí: zdroje molekulárního svazku, čtyřpólového kondensátoru a resonátoru. Schéma molekulárního generátoru s udáním hlavních rozměrů je uvedeno



Obr. 6. Závislost energie vzájemného působení ( $W$ ) molekul na intenzitě vnějšího elektrického pole.  
1 — Energie.



Obr. 7. Řez čtyřpólovým kondensátorem.



Obr. 8. Schéma molekulárního generátoru se svazkem molekul čpavku. 1 — Zdroj svazku, 2 — Mřížka, 3 — Clona ochlazovaná kapalným dusíkem, 4 — Elektrody čtyřpólového kondensátoru, 5 — Resonátor, 6 — Vlnovod.

na obr. 8. Molekulární svazek je tvořen mřížkou z měděné folie. Mřížka má otvory o rozměru  $0,05 \times 0,05 \text{ mm}^2$ ; vzdálenosti mezi otvory jsou též  $0,05 \text{ mm}$ . Komora zdroje se plní z láhve technickým čpavkem, jehož tlak se snižuje



redukčním ventilem. V komoře zdroje dosahuje tlak asi 0,1 mm rtuťového sloupce. Svazek prochází clonou, ochlazovanou kapalným dusíkem, která vymezuje ze širokého svazku svazek o průměru 5 mm. Dále prochází svazek čtyřpólovým kondensátorem, ve kterém se molekuly třídí. Svazek aktivních molekul, vycházejících z kondensátoru prochází dutinovým resonátorem, který je naladěn na frekvenci spektrální čáry.

Aby se vytvářel molekulární svazek, je nutno udržovat tlak uvnitř generátoru  $10^{-5}$  až  $10^{-6}$  mm Hg. K tomu jsou zapotřebí velmi výkonné vývěvy s čerpací rychlostí  $10^4$ – $10^5$  l/sec. Proto se čpavek obvykle neodčerpává, nýbrž vymrazuje na stěnách komory a ve zvláštních jímačích kapalným dusíkem. Napětí par čpavku je při teplotě kapalného dusíku asi  $10^{-6}$  mm Hg.

K detekci vyzařování molekulárního generátoru, který má výkon  $10^{-9}$  až  $10^{-10}$  W, se používá obvykle superheterodynový přijímač centimetrových vln.

Stabilita frekvence molekulárního generátoru se určuje srovnáváním frekvencí dvou molekulárních generátorů proto, že doposud nejsou známy jiné generátory s potřebnou stabilitou frekvence.

Výzkum molekulárních generátorů se svazkem molekul čpavku se nyní provádí v řadě laboratoří v SSSR i v jiných zemích. Molekulární generátory se začaly používat jako normály frekvence. Vyvíjí se obvod fázové stabilisace frekvence klystronu pomocí molekulárního generátoru. Tato metoda umožňuje dosáhnout vysoké stability frekvence kmitů o značně větším výkonu než může bezprostředně dát molekulární generátor.

## Molekulární generátory a zesilovače s využitím energetických hladin v krystalech

*Spektrum paramagnetických iontů v krystalech.* Elektronové paramagnetické resonance může být využito k vytvoření molekulárních generátorů a zesilovačů. Nebudeme se u tohoto jevu, popsáního ve stati S. A. Aľtschulera<sup>7)</sup>, dlouho zdržovat, uvedeme jen fakta, důležitá pro pochopení funkce molekulárních generátorů a zesilovačů.

Paramagnetický iont má jednak magnetický moment dráhy elektronu, jednak vlastní magnetický moment rotace samého elektronu. Vlivem krystalického pole mřížky dochází k rozštěpení energetických hladin tohoto iontu. Při působení stálého vnějšího magnetického pole dochází k dalšímu štěpení hladin; přitom vzdálenost mezi energetickými hladinami bude záviset na velikosti vnějšího pole. Na obr. 9 je uvedena soustava energetických hladin iontů  $Cr^{+++}$  pro případ, kdy magnetické pole je rovnoběžné s osou symetrie krystalu.

Změníme-li intenzitu pole a zvolíme-li úhel mezi osou symetrie krystalu a vnějším magnetickým polem z uvedených čtyř hladin, můžeme získat tři hladiny, splňující požadavky podle obr. 3. Proto mohou být paramagnetické ionty využity pro stavbu molekulárních generátorů a zesilovačů s pomocným vysokofrekvenčním zářením pro získávání aktivních „paramagnetických iontů“. Paramagnetická resonance má obyčejně širokou rezonanční křivku (desítky Mc/sec a více), a tato šířka není závislá na teplotě. Abychom dosáhli nasycení, v daném případě při nízkých teplotách, stačí velmi malý výkon (miliwatty).

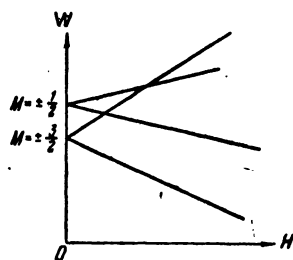
<sup>7)</sup> Viz „Přiroda“ 1957, č. 2, str. 14–24.

Šíře propustného pásma takových zesilovačů je dána šíří vstupní spektrální čáry nebo dokonce i šíří propustného pásma dutinového resonátoru. Proto mohou mít takové zesilovače dostatečně široké propustné pásmo.

Na rozdíl od systémů s molekulárními svazky můžeme v paramagnetických systémech získávat daleko větší počet aktivních iontů, což vyplývá z jejich velké koncentrace v krystalu. Proto u takových systémů bude výstupní výkon značně větší než v systémech s molekulárními svazky.

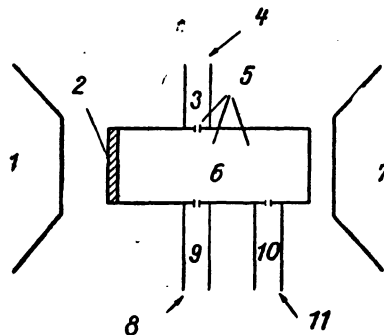
Velká šíře vstupní spektrální čáry a závislost frekvence na magnetickém poli, a též určitá závislost na frekvenci pomocného pole znemožňují použití těchto systémů k získání kmitů s vysokou stabilitou. Avšak jejich výhodou je snadné přeladění frekvence změnou intenzity vnějšího pole. Používá se jich proto jako širokopásmových zesilovačů. Šum zesilovače klesá se snížením teploty krystalu, takže snížení teploty je pro funkci zesilovače výhodné.

Obr. 9. Závislost energie vzájemného působení chromových par s vnějším magnetickým polem, které je souběžné s osou symetrie krystalu.

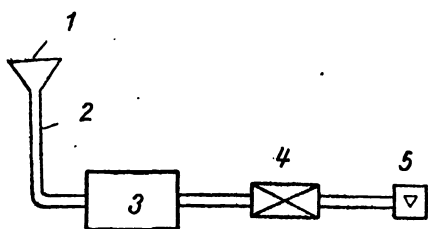


**Konstrukce zesilovače.** Principiální schéma zesilovače je na obr. 10.

Používaný paramagnetický krystal je umístěn v dutinovém resonátoru, jehož frekvence je současně nastavena na frekvenci zesilovaného signálu a frekvenci pomocného elektromagnetického pole. V místě maxima intenzity magnetických



Obr. 10.



Obr. 11.

Obr. 10. Schéma molekulárního zesilovače. 1 — Pól magnetu, 2 — Paramagnetický krystal, 3 — Vlnovod, 4 — Zesilovaný signál, 5 — Vazebné otvory, 6 — Resonátor, 7 — Pól magnetu, 8 — Výstup zesilovače, 9 — Vlnovod, 10 — Vlnovod, 11 — Pomocné záření.

Obr. 11. Blokové schéma zapojení molekulárního zesilovače. 1 — Anténa, 2 — Vlnovod, 3 — Zesilovač, 4 — Ferritová soustava, 5 — Detektor.

polí obou kmitání je umístěn paramagnetický krystal. Resonátor je umístěn v Dewarově nádobě a ochlazován kapalným heliem na 2–4 °K. Přívodní vlnovody se pro lepší tepelnou izolaci zhotovují z materiálů o malé tepelné vodivosti. Resonátor je umístěn mezi póly elektromagnetu.

Blokové schéma zapojení zesilovače je na obr. 11. Signál přijímaný anténou je přiváděn na vstup zesilovače. Ze zesilovače je signál veden do detektoru

přes ferritovou<sup>8)</sup> soustavu, která propouští záření od zesilovače do detektoru, ale nepropouští záření směrem opačným. Bez tohoto zařízení by šum detektoru přicházel zpět do rezonátoru a zesiloval by se, což by vedlo ke snížení citlivosti přijímače.

Molekulární generátor, pracující se svazkem molekul čpavku, může být kalibračním zdrojem kmitů o vysoké stabilitě. Přesto, že výzkum molekulárních generátorů je prováděn teprve dva až tři roky, je již nyní experimentálně dokázáno, že kmity molekulárního generátoru se vyznačují velmi vysokou monochromitou a stabilitou frekvence. V malém časovém úseku dosahuje poměrná stabilita  $10^{-12}$ , na příklad při vybuzečné frekvenci 23870,13 Mc/sec se nemění více než o jednu setinu c/sec. Molekulární generátor může být absolutním normálem frekvence se stabilitou lepší než  $10^{-9}$ . To znamená, že jestli nezávisle zhotovíme a seřídíme (při zachování určitých pravidel), dva molekulární generátory, budou se jejich frekvence lišit nejvýše o 24 c/sec, při  $\nu_0 \sim \sim 23870$  Mc/sec.

Vysoká stabilita frekvence umožňuje použít molekulární generátory v různých oborech vědy a techniky, na příklad v radionavigaci, v radiolokaci, radiogeodesii, pro konstrukci hodin o velké přesnosti apod.

Molekulární generátory umožní přistoupit k experimentálnímu ověření závěrů závěrů všeobecné teorie relativity o závislosti rychlosti plynutí času na gravitačním poli. Podle této teorie půjdou různou rychlostí dvoje stejné hodiny změnou gravitačního pole — budou-li jedny z nich umístěny u povrchu Země a druhé budou zvednuty do určité výše nad povrch Země. Změna frekvence (rychlosti plynutí času) je nepatrná a rovná se  $-10^{-13} \nu$  na 1 km vertikální vzdálenosti. Proto je ke zjištění tohoto efektu zapotřebí velmi stabilních generátorů. Použijeme-li k tomuto účelu umělou družici Země, ve které umístíme molekulární generátor, můžeme dosáhnout změnu frekvence několika c/sec vzhledem ke generátoru, umístěnému na Zemi. Praktické uskutečnění tohoto pokusu by bylo zajímavé, je však spojeno s překonáním velkých potíží. Podrobnější úvahy o zkoumání všeobecné teorie relativity jsou uveřejněny ve stati V. L. Ginzburga<sup>9)</sup>.

Molekulární zesilovače poskytují nové možnosti jak v čistě vědeckém použití, tak i při řešení mnoha praktických úkolů. Použití zesilovačů tohoto druhu umožní podstatně rozšířit dostupné meze ve zkoumání vesmíru a také, jak se předpokládá, umožní pozorovat slabé záření různých atomů a volných radikálů, nacházejících se ve světovém prostoru.

*Přeložil B. Slavík.*

<sup>8)</sup> Ferrity jsou vysokofrekvenční materiály, které mají magnetické vlastnosti, které se mění vlivem vnějšího magnetického pole.

<sup>9)</sup> Viz „*Priroda*“, 1956, č. 9, str. 30—39.