

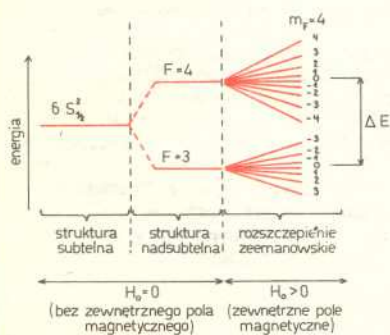
Dr inż. Ryszard KUŃSKI



Pieniądzy też mają ludzie zwykle za mało, z czego można wnioskować, że „czas to pieniądz”.

$$f = \frac{1}{T}$$

Cez (Cs) to metal alkaliczny. Liczba atomowa 55. Masa atomowa 132,05. Izotop naturalny ^{133}Cs . Potencjał jonizacji 3,89 eV. Temperatura topnienia $+28,5^\circ\text{C}$, temperatura wrzenia $+670^\circ\text{C}$ (pod ciśnieniem normalnym). Gęstość $1,873\text{ g/cm}^3$ w temperaturze $+20^\circ\text{C}$. Cez odkryli Bunsen i Kirchoff w roku 1860 w trakcie badań spektroskopowych.



Współczynnik liczbowy 427 odnosi się do wartości natężenia pola H_0 , wyrażonego w erstedach. W obowiązującym obecnie układzie jednostek SI, natężenie pola magnetycznego należy wyrażać w amperach na metr [A/m]. Z uwagi na dostępną literaturę dotyczącą wzorców atomowych zastosowano „stare” współczynniki, wyrażone w układzie CGS–M.

W codziennym życiu wiele naszych działań uwarunkowanych jest przez czas. Nie zdajemy sobie z tego sprawy, bo od pierwszych naszych dni żyjemy w określonej cywilizacji, determinującej nasze postępowanie, m.in. — w skali czasu.

Dobrze pamiętamy pewne zdarzenia, ale nie rejestrujemy upływu czasu w sposób jednostajny. Upływ czasu jest tworem wyobraźni człowieka. Obiektywnie rejestruje się go za pomocą zegarów. W miarę rozwoju społeczeństw — rośnie potrzeba rejestracji coraz krótszych odcinków czasu i rosną wymagania co do precyzji ich pomiarów. Rozwija się dziedzina nauki i techniki zajmująca się badaniem zjawisk mogących stanowić „zegar”, tzn. urządzenie do określania odcinków czasu. Funkcję zegara mogą spełniać procesy, które przebiegają cyklicznie. Mogą to być ruchy Ziemi, procesy biologiczne, procesy radioaktywne, drgania mechaniczne, drgania elektromagnetyczne, absorpcja lub emisja kwantów energii przy przejściach energetycznych atomów i molekuł itp. Wykorzystanie jednej z możliwych metod czy jakiegoś zjawiska do budowy zegara związane jest z potrzebą pomiaru określonego odcinka czasu. We wszystkich pomiarach czasu wykorzystuje się w tym celu w sposób umowny cykle przebiegu jakiegoś zjawiska, a przez zliczanie cyklicznych jego przebiegów otrzymujemy informację, jak „dużo czasu upłynęło”.

Sam czas jest pojęciem pierwotnym, ale jak powiedział jeden z moich kolegów: „ma tę cechę, że jest go zawsze za mało”. W tym humorystycznym stwierdzeniu jest dużo prawdy. W wielu doświadczeniach fizycznych i w procesach technicznych pomiar czasu musi być dokonywany bardzo szybko. Innymi słowy, zdolność rozdzielcza układu mierzącego czas musi być dużo większa od mierzonego odcinka czasu. Oznacza to, że zjawiska okresowe, wykorzystywane w danym zegarze, muszą trwać dużo krócej od mierzonego odcinka czasu. Współczesny rozwój nauki i techniki, stymulując z jednej strony rozwój metod i urządzeń, domaga się jednocześnie coraz precyzyjniejszych metod i i narzędzi.

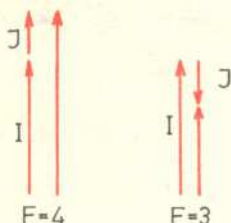
W dziedzinie pomiarów i odtwarzania skali czasu najprecyzyjniejsze są w chwili obecnej atomowe wzorce częstotliwości. Popularna nazwa tych urządzeń — zegary atomowe — wiąże się ze ścisłą zależnością okresu (T) i częstotliwości (f), charakteryzujących każde zjawisko okresowe. Na obecnym etapie rozwoju techniki i technologii najszerze rozpowszechnienie znalazły wzorce częstotliwości z wiązką atomów cezu, masery wodorowe i wzorce rubidowe z pompowaniem optycznym. Parametry i właściwości tych wzorców są różne, ale wzajemnie się one uzupełniają. Dzięki temu najpoważniejsze laboratoria czasu i częstotliwości dysponują zestawem wymienionych wyżej wzorców. Pozwala to zaspokoić wszystkie potrzeby aktualnych użytkowników wzorców czasu (a więc i częstotliwości). Należy podkreślić, że pierwotnym wzorcem częstotliwości, tzn. takim z którym porównuje się wszystkie inne wzorce częstotliwości, jest wzorec z wiązką atomów cezu.

Wspólną cechą atomowych wzorców częstotliwości jest wykorzystanie zbiorowiska swobodnych atomów wodoru lub metali alkalicznych (z jednym elektronem walencyjnym) w stanie podstawowym. Przy zachowaniu pewnych warunków technicznych eksperymentu możliwe jest wywołanie przejść pomiędzy odpowiednimi poziomami energetycznymi atomów, a to związane jest z absorpcją lub emisją kwantu energii. Zachodzi więc absorpcja lub emisja fali elektromagnetycznej o określonej częstotliwości.

Prześledzimy procesy i zasadę działania wzorca z wiązką atomów cezu. Dla celów stabilizacji częstotliwości wykorzystuje się naturalny izotop cezu Cs^{133} w stanie podstawowym, tzn. w stanie, w którym atomy posiadają najniższą energię potencjalną (nie mylić z energią kinetyczną). Atomy cezu w stanie podstawowym mają dwa poziomy energetyczne struktury nadsubtelnej o liczbach kwantowych $F = 4$ i $F = 3$. W obecności zewnętrznego pola magnetycznego o natężeniu H_0 następuje rozszczepienie tych poziomów na 9 i 7 składowych zeemanowskich (zjawisko Zeemana) o liczbach kwantowych m_F . Jak widać na rysunku, jest to struktura skomplikowana. W cezowych wzorcach częstotliwości wykorzystuje się jedynie dwa poziomy zeemanowskie o liczbach kwantowych $m_F = 0$ z grup poziomów $F = 3$ i $F = 4$. Realizuje się przejścia $F = 4, m_F = 0 \rightleftharpoons F = 3, m_F = 0$. Przejście energetyczne atomu pomiędzy tymi poziomami zachodzi przy emisji lub absorpcji kwantu energii ΔE o częstotliwości $f_0 = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$. Wartość tej częstotliwości jest aproksymowana dla przypadku, gdy na zbiorowisko atomów cezu nie działają żadne pola. Ale, jak powiedziano wyżej, dla rozszczepienia poziomów struktury nadsubtelnej na składowe zeemanowskie konieczne jest działanie zewnętrznego pola magnetycznego o natężeniu H_0 . Pole to powoduje, że częstotliwość podanego przejścia energetycznego jest większa o wartość $\Delta f = 427 H_0^2 \text{ Oe}^{-2}\text{Hz}$. Tak więc w warunkach fizycznych realizacji eksperymentu przy przejściach energetycznych cezu Cs^{133} pomiędzy poziomami $F = 4, m_F = 0 \rightleftharpoons F = 3, m_F = 0$, częstotliwość przejścia wynosi $f = (9\,192\,631\,770 + 427 H_0^2 \text{ Oe}^{-2})\text{Hz}$.

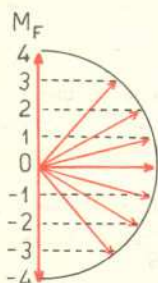
Jak działa wzorec częstotliwości z wiązką atomów cezu? Zasadniczą jego cechą jest bierność. Oznacza to, że procesy fizyczne (przejścia energetyczne atomów cezu) służą jedynie do

Struktura nadsubtelna poziomu energetycznego atomu związana jest z momentem J i m oraz momentem I oraz momentem całkowitym F elektronu na zewnętrznej orbicie atomu. Z uwagi na możliwe dwie wzajemnie orientacje tych momentów: równoległą i antyrównoległą — liczba

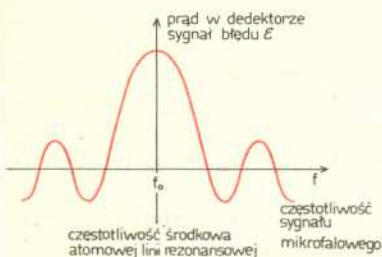


kwantowa F poziomów struktury nadsubtelnej przybiera wartości $F = I + J$. Dla cezu Cs^{133} w stanie podstawowym $I = 7/2$, $J = 1/2$, więc $F = 7/2 \pm 1/2$; daje to wartości $F = 4$ i $F = 3$.

Istnienie poziomów zeemanowskich, oznaczanych za pomocą liczby kwantowej m_F , jest wynikiem magnetycznych właściwości atomów. Jeśli atom znajduje się w polu magnetycznym o natężeniu skierowanym np. wzdłuż osi Oz , to istnieje $2F + 1$ możliwych orientacji momentu magnetycznego atomu — takich mianowicie, że rzuty momentu magnetycznego atomu na wyróżniony kierunek przybierają wartości skwantowane. Dla cezu Cs^{133} w stanie podstawowym mamy $F = 4$ i $F = 3$. Możliwych jest więc 9 i 7 orientacji momentu magnetycznego atomu cezu względem kierunku natężenia zewnętrznego pola magnetycznego.

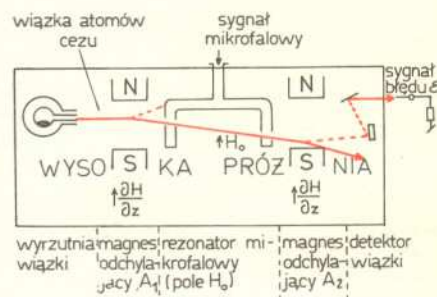
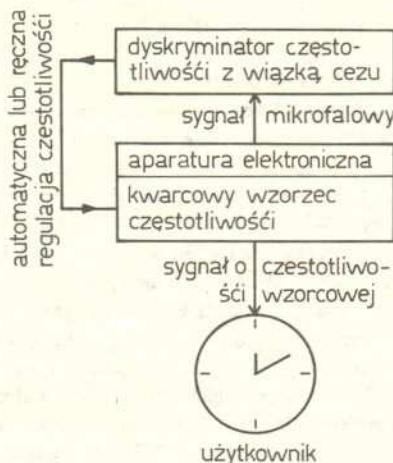


Jeśli na atomy nie działa żadne pole magnetyczne, to poziomy energetyczne odpowiadające różnym orientacjom momentu magnetycznego atomu pokrywają się. Mówi się, że poziom F jest $2F + 1$ -krotnie zdegenerowany (zwyrodniały). Jeśli na atom działa pole magnetyczne, to różnym orientacjom momentu magnetycznego odpowiadają różne wartości energii potencjalnej momentu magnetycznego; w polu tym poziomy rozszczepiają się. Mówi się, że pole magnetyczne usuwa degenerację poziomu energetycznego F .



precyzyjnego określenia częstotliwości z zewnętrznego źródła. W zespole urządzeń stanowiących wzorzec można wyróżnić atomowy dyskryminator częstotliwości oraz zespół aparatury elektronicznej z precyzyjnym wzorcem kwarcowym. Dyskryminator częstotliwości jest układem odniesienia, a wzorzec kwarcowy z aparaturą elektroniczną służy do wytworzenia sygnału mikrofalowego o częstotliwości przejść energetycznych atomów cezu. W zespole aparatury elektronicznej wykorzystuje się zwykle wysokiej klasy wzorzec kwarcowy o częstotliwości 2,5 MHz lub 5 MHz. Stanowi on źródło częstotliwości służącej do wytworzenia sygnału pobudzającego dyskryminator oraz jest źródłem sygnału dla użytkownika.

Jak jest zbudowany atomowy dyskryminator częstotliwości? Zasadniczym zadaniem dyskryminatora z wiązką cezu jest wytworzenie takich warunków, które umożliwią oddziaływanie pola mikrofalowego na swobodne atomy cezu. Ma to doprowadzić do wymuszenia żądanych przejść energetycznych w ciezie przez pole mikrofalowe. Jeżeli sygnał mikrofalowy wywoła żądane przejścia energetyczne, zmieni się natężenie padającego na detektor strumienia atomów cezu. Jest to informacja, że częstotliwość sygnału mikrofalowego mieści się w zakresie szerokości atomowej linii rezonansowej dyskryminatora.



Istnieje szereg rozwiązań technicznych atomowego dyskryminatora częstotliwości z wiązką atomową cezu. Zasada działania jest jednak wspólna. Wiązkę atomową cezu wytwarza się w specjalnej wyrzutni. Cez w pojemniku podgrzewa się do temperatury ok. $+100^\circ C$. Prężność par cezu w tej temperaturze wynosi ok. 10^{-6} Tr. W jednej ścianie wyrzutni znajdują się bardzo precyzyjnie uformowane kanały, które kształtują efundujące do obszaru z wysoką próżnią atomy cezu w wiązkę. Atomy w wiązce poddawane są kolejno działaniu stałego pola magnetycznego w obszarze magnesu odchyłającego A_1 , pola mikrofalowego w obszarze rezonatora, stałego pola magnetycznego w obszarze magnesu A_2 i wpadają w obszar detektora wiązki atomowej. Pola magnetyczne w magnesach A_1 i A_2 , posiadające natężenie 5–10 kOe i gradient ok. 10 kOe/cm, powodują, że wiązka atomowa rozszczepia się na dwie składowe. Wykorzystuje się tu efekt kwantyzacji przestrzennej momentów magnetycznych atomów cezu. Część wiązki w obszarze magnesu A_1 odchyłana jest w kierunku osi układu.

Załóżmy, że do rezonatora mikrofalowego nie przykładamy pola mikrofalowego lub że częstotliwość tego pola jest tak odległa od częstotliwości nominalnej przejścia energetycznego cezu, że pole nie działa na atomy. W takim przypadku w obszarze magnesu A_2 wiązka cezu zostanie odchyłona w tym samym kierunku jak w obszarze magnesu A_1 . Przy podanej konfiguracji elementów dyskryminatora wiązka atomów cezu nie trafi do detektora. Jeżeli w obszarze rezonatora mikrofalowego wywołamy przejścia energetyczne atomów cezu ($F = 4, m_F = 0 \rightleftharpoons F = 3, m_F = 0$), będzie to równoznaczne ze zmianą orientacji spinu elektronu walencyjnego względem momentu jądrowego, a więc ze zmianą orientacji całkowitego momentu magnetycznego atomów cezu względem kierunku natężenia pola. W takim przypadku w obszarze magnesu A_2 kierunek odchylenia wiązki będzie przeciwny w stosunku do odchylenia w obszarze magnesu A_1 i wiązka trafi na detektor. Pojawi się sygnał błędny ϵ w postaci prądu płynącego w obwodzie detektora.

Dlaczego sygnał błędny? Otóż efekt działania pola mikrofalowego na atomy cezu w wiązce ma charakter statystyczny. Prawdopodobieństwo wywołania przejścia energetycznego zależy m.in. od różnicy między częstotliwością odpowiadającą środkowej atomowej linii rezonansowej (w danych warunkach realizacji eksperymentu) a częstotliwością pola mikrofalowego. Tak więc natężenie prądu płynącego w obwodzie detektora wiązki atomowej świadczy o dokładności dostrojenia częstotliwości pola mikrofalowego do częstotliwości atomowego dyskryminatora częstotliwości. Powiedzieliśmy we wstępie, że wzorzec cezowy jest wzorcem typu pierwotnego. Na czym to polega? Najważniejszą właściwością tego urządzenia jest to, że układ atomowego dyskryminatora



Rozwiązanie zadania M.41

W n -kącie wypukłym z jednego wierzchołka wychodzi $n-3$ przekątnych, wobec

czego wszystkich przekątnych jest $\frac{1}{2} n(n-3)$

(dzielimy przez 2, ponieważ każda przekątna została dwukrotnie policzona: raz przy każdym swym końcu). Dwunastokąt wypukły ma więc 54 przekątne. Przez dowolny punkt płaszczyzny poprowadzimy proste równoległe do tych przekątnych. Dzielą one płaszczyznę na 108 kątów. Któryś z nich musi być mniejszy od 4° , gdyż w przeciwnym przypadku suma wszystkich kątów byłaby $\geq 108 \cdot 4^\circ = 732^\circ$ — sprzeczność. Przekątne równoległe do prostych wyznaczających kąt $< 4^\circ$ same tworzą kąt $< 4^\circ$.

Sekunda jest czasem równym 9 192 631 770 okresów promieniowania odpowiadającego przejściu między dwoma nadsubtelnymi poziomami stanu podstawowego atomu cezu 133^m.

Definicja ta jest oparta na uchwałach XI Generalnej Konferencji Miar 1960 r. Zarządzenie Prezesa Centralnego Urzędu Jakości i Miar z dnia 17 kwietnia 1971 r. Monitor Polski, r 25, z dnia 3 maja 1971).



częstotliwości umożliwiają autokalibrację. Dzieje się tak z dwu głównych przyczyn. Po pierwsze — zbiorowisko atomów cezu, decydujące o wartości częstotliwości własnej atomowego dyskryminatora częstotliwości, ma cechy zbioru atomów swobodnych. Dzięki temu, że w obszarze oddziaływania pola mikrofalowego atomy uformowane są w wiązkę, pomija się wpływ zderzeń pomiędzy atomami na częstotliwości przejścia energetycznego. Cez w postaci gazu atomowego przy odpowiedniej konstrukcji dyskryminatora posiada cechy zbiorowiska swobodnych atomów. Konstrukcja dyskryminatora i dobór materiałów powinny być takie, aby atomy w wiązce były chronione przed działaniem niepożądanych pól. Po drugie — dla uzyskania rozszczepienia zeemanowskiego w obszarze rezonatora konieczne jest wytworzenie stałego pola magnetycznego o natężeniu H_0 . Pole to, konieczne dla właściwego działania dyskryminatora, wpływa na częstotliwość własną dyskryminatora. Jest to efekt szkodliwy, wynikający z zasady działania i konstrukcji urządzenia.

Kapitał jednak znaczenie ma okoliczność, że wpływ tego efektu można określić za pomocą tego samego dyskryminatora. Wykorzystuje się tu przejścia $\Delta m_F = \pm 1$ dla poziomu $F = 4$ lub $F = 3$ struktury nadsubtelnej. Częstotliwość związana z przejściem $m_F = 0 \leftrightarrow m_F = \pm 1$ dla poziomu $F = 3$ lub $F = 4$ wynosi ok. 350 kHz dla pola o natężeniu $H_0 = 1$ Oe. W typowych konstrukcjach dyskryminatorów cezowych natężenie pola H_0 wynosi 20 do 50 mOe, co odpowiada częstotliwości przy przejściach $m_F = \pm 1$ od 7 do 17,5 kHz. Jeśli w obszarze rezonatora mikrofalowego będzie działało dodatkowe pole elektromagnetyczne o częstotliwości odpowiedniej dla wywołania przejść $\Delta m_F = \pm 1$, $F = 0$, to spowoduje ono wzrost lub zmniejszenie wartości prądu płynącego w obwodzie detektora atomowego dyskryminatora częstotliwości. Efekt ten nastąpi tylko przy określonej częstotliwości tego pola, wyznaczonej przez wartość natężenia stałego pola H_0 . Tak więc przez pomiar częstotliwości pola wywołującego przejścia $\Delta m_F = \pm 1$ można określić natężenie pola H_0 . Pozwala to na określenie własnego błędu atomowego dyskryminatora częstotliwości. Układ jest samokalibrowalny, dzięki czemu traktuje się go w chwili obecnej jako pierwotny wzorzec częstotliwości. Częstotliwość przejścia energetycznego cezu Cs^{133} stanowi również podstawę obowiązującej obecnie definicji sekundy. Podany wyżej opis zasady działania wzorca z wiązką cezu zawiera jedynie szkic kinetyki działania takiego układu. Warunków technicznych koniecznych dla realizacji eksperymentu jest w rzeczywistości dużo więcej. W technicznej realizacji wzorca występują ponadto bardzo poważne problemy materiałowe i technologiczne. We wzorcu atomowym spotykają się techniki wysokiej próżni, stałych i zmiennych pól magnetycznych, mikrofal, pomiarów prądów ekstremalnie małych, układów pomiarowych ekstremalnie stabilnych sygnałów wzorcowych i in.

Z tych powodów budową atomowych wzorców częstotliwości mogą zajmować się tylko laboratoria mające zaplecze technologiczne i techniczne na bardzo wysokim poziomie. Przy budowie wzorców atomowych wykorzystuje się zwykle doświadczenia i możliwości technologiczne wielu instytutów i fabryk. Tak było przy budowie pierwszego w Polsce wzorca z wiązką cezu. Prace nad atomowym cezowym wzorcem częstotliwości rozpoczęto w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN w roku 1960. W skład zespołu pracowników naukowych wchodził prof. dr S. Hahn (kierownik pracowni), dr inż. A. Chachulski oraz autor niniejszego artykułu. Model laboratoryjny wzorca uruchomiono w roku 1966. W latach następnym, w pracowni Atomowych Wzorców Częstotliwości IPPT, pod kierownictwem dr A. Chachulskiego, prowadzono prace nad wzorcem częstotliwości typu stacjonarnego, przeznaczonego dla Krajowej Służby Częstotliwości Wzorcowych. W roku 1972 wzorzec cezowy wraz z odpowiednią aparaturą towarzyszącą przekazano resortowi łączności. Od roku 1972 sygnały częstotliwości wzorcowej, emitowane przez stację Warszawa I, odnoszone są do częstotliwości wzorca atomowego.

W czasie realizacji prac nad wzorcami atomowymi z zespołem pracowników w IPPT współpracowali ściśle specjaliści z wielu instytutów i zakładów produkcyjnych w kraju. Z usług systemów częstotliwości wzorcowej korzysta nie tylko służba czasu, ale też wiele innych dziedzin nauki i techniki: radionawigacja, geodezja, radiokomunikacja i inne. Od precyzji źródeł sygnału wzorcowego zależy bezpieczeństwo i prowadzenie lotów kosmicznych — z jednej strony oraz dokładność i szybkość pomiarów w przemyśle — z drugiej, żeby już nie wspomnieć o dokładnych pomiarach bardzo szybkich i niezwykle krótkotrwałych zjawisk w laboratoriach naukowych.

Nowy rekord

Pisaliśmy w zeszłym roku («Delta», 1974, 3, str. 5) o matematyku pracującym w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN pod Genewą, który w ciągu 5 minut obliczył pierwiastek 19 stopnia z liczby 133 cyfrowej. Rekord został pobity latem 1974 roku. Tym razem zadanie było trudniejsze. Wim Klein obliczył pierwiastek 37 stopnia z liczby 220 cyfrowej w czasie 3 minut i 26 sekund. System kontroli był dokładnie taki sam jak poprzednio. Wynik sprawdzono przy pomocy maszyny cyfrowej. Okazał się bezbłędny.