

Atomowe wzorce częstotliwości, zegary atomowe i atomowa skala czasu

Dr Karol RADECKI

PODSTAWY FIZYCZNE DZIAŁANIA ATOMOWYCH WZORCÓW CZĘSTOTLIWOŚCI

Atomowe wzorce częstotliwości należą do najwyższej klasy wzorców. Posiadają one doskonałą odtwarzalność i stabilność częstotliwości. Przy ich budowie wykorzystuje się zdolność emisji lub absorpcji przez atomy promieniowania elektromagnetycznego, o znanej z dużą dokładnością częstotliwości. Najczęściej stosowanymi są atomy wodoru, cezu i rubidu. Emitowana lub absorbowana częstotliwość f_0 jest związana z różnicą energii między poziomami energetycznymi p i q atomu następującą relacją:

$$hf_0 = E_q - E_p,$$

gdzie h jest stałą Plancka. Dla odosobnionego atomu energie E_p i E_q , a więc i częstotliwość f_0 można uważać za stałe, ponieważ dotychczas nie stwierdzono eksperymentalnie ich zmienności, a w szczególności zjawiska starzenia się atomu. Wykorzystywana we wzorcach częstotliwości różni się nieco od częstotliwości f_0 na skutek wpływu zewnętrznych pól magnetycznych i elektrycznych oraz innych czynników.

Należy zwrócić uwagę, że zdolność emisji lub absorpcji w rzeczywistości dotyczy pewnego pasma częstotliwości Δf , i w związku z tym mówi się o szerokości linii rezonansu atomowego (rys. 1).

Do celów wzorcowych są wykorzystywane linie o możliwie małej względnej szerokości $\frac{\Delta f}{f}$,

która zależy głównie od własności atomów i konstrukcji wzorca. W szczególności, szerokość linii jest tym większa, im większy jest czas oddziaływania pola mikrofalowego na atom.

W atomowych wzorcach wykorzystuje się przejścia magnetyczne między poziomami energetycznymi w nadsubtelnej strukturze stanu podstawowego $^2S_{1/2}$ atomów. Struktura taka powstaje w wyniku oddziaływania własnych momentów pędu (spinów) jądra i elektronu walencyjnego atomu. Różnica energii między tymi poziomami odpowiada częstotliwości f_0 , która leży w zakresie mikrofal.

Poziomy struktury nadsubtelnej są opisane przez liczby kwantowe $F = I + 1/2$ i $F = I - 1/2$, gdzie I jest liczbą kwantową spinu jądra. W obecności stałego zewnętrznego pola magnetycznego poziomy struktury nadsubtelnej ulegają rozszczepieniu na $2F + 1$ poziomów (rys. 2). Do celów wzorcowych są wykorzystywane przejścia między poziomami o liczbie kwantowej $m_F = 0$. Częstotliwość dla tego przejścia jest najmniej zależna od natężenia pola magnetycznego i wynosi:

$$f = f_0 + C_H \cdot H^2.$$

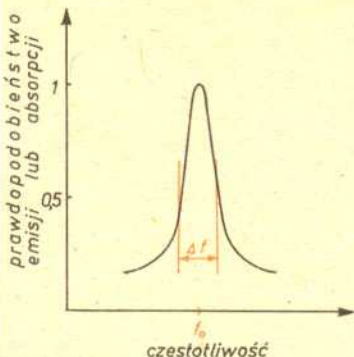
Wartości współczynnika C_H oraz częstotliwości f_0 dla atomów wodoru, rubidu i cezu podano w tabeli.

Pierwiastek	Izotop	I	Przejście energetyczne	f_0 [Hz]	C_H [Hz/(A/m) ²]
Wodór	¹ H	$\frac{1}{2}$	$F = 1, m_F = 0 \rightarrow F = 0, m_F = 0$	1420405751	0,4356
Rubid	⁸⁷ Rb	$\frac{3}{2}$	$F = 2, m_F = 0 \rightarrow F = 1, m_F = 0$	6834682608	0,0905
Cez	¹³³ Cs	$\frac{7}{2}$	$F = 4, m_F = 0 \rightarrow F = 3, m_F = 0$	9192631770	0,0673

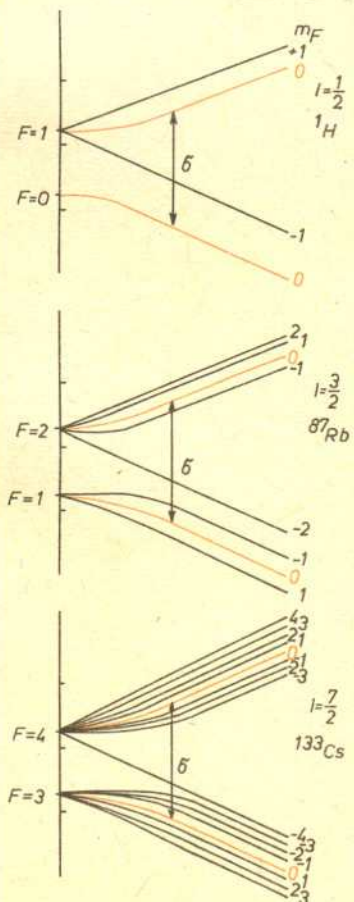
W praktyce, dla obserwacji przejścia energetycznego stosuje się bardzo słabe zewnętrzne pole H_0 . W celu uzyskania dużego natężenia linii rezonansowej jest konieczne zachwianie naturalnej populacji obsadzeń poziomów, między którymi zachodzi przejście energetyczne. Jak wiadomo, w stanie równowagi cieplnej stosunek liczby atomów znajdujących się w górnym stanie energii E_2 do liczby atomów znajdujących się w dolnym stanie energii E_1 , określa wzór

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left[\frac{-(E_2 - E_1)}{kT}\right],$$

gdzie k jest stałą Boltzmann.



Rys. 1. Linia rezonansu atomowego.



Rys. 2. Rozszczepienie poziomów nadsubtelnej struktury $^2S_{1/2}$ atomów wodoru, rubidu i cezu w polu magnetycznym.



Przy stosowanych we wzorcach atomowych temperaturach T , dla wszystkich wykorzystywanych przejść, $E_2 - E_1 \ll kT$, co oznacza, że względna różnica populacji obsadzeń jest bardzo mała. Stan inwersji obsadzeń uzyskuje się bądź drogą przestrzennej separacji atomów znajdujących się w rozważanych stanach energetycznych, bądź w procesie optycznego pompowania. Przestrzenna separacja atomów jest najstarszą metodą wytwarzania stanu inwersji obsadzeń i dotyczy wiązek atomów lub molekuł (substancji gazowej) posiadających różny od zera dipolowy moment elektryczny lub magnetyczny.

W przypadku atomów wodoru, rubidu i cezu, które są obdarzone dipolowym momentem magnetycznym, przestrzennej separacji pożądaných atomów można dokonać przepuszczając strumień tych atomów przez silne niejednorodne pole magnetyczne.

Na atomy działa wówczas siła o składowych

$$F_i = \mu \cdot \text{grad } H_i, \quad i = 1, 2, 3,$$

której wartość i kierunek zależy od gradientu pola magnetycznego oraz przestrzennej orientacji momentu magnetycznego μ atomu. Ponieważ przejściu (patrz rys. 2) towarzyszy taka zmiana orientacji w przestrzeni wektora μ , że kierunek działania siły zmienia się na przeciwny, zatem możliwa jest przestrzenna separacja pożądaných atomów w wiązce. W praktyce, wysoka sprawność separacji uzyskuje się przy przepuszczeniu wiązki atomowej między nadbiegunnikami wielobiegunowego magnesu w polu o gradiente większym niż 3000 A/cm^2 .

W procesie optycznego pompowania różnicą populacji obsadzeń poziomów powstaje w wyniku działania na zbiorowisko atomów promieniowania optycznego, pochodzącego z zewnętrznego źródła światła. Rys. 3 ilustruje zjawiska występujące przy optycznym pompowaniu. Pokazano tu uproszczony schemat poziomów energetycznych atomu rubidu ^{87}Rb . Zewnętrzne promieniowanie optyczne (o długości fali $\lambda = 780 \text{ nm}$) powoduje przejście ze stanu podstawowego $^2S_{1/2} F = 1$ do stanu wzbudzonego $^2P_{3/2}$. Ponieważ atomy rubidu w wyniku emisji spontanicznej wracają do obu stanów podstawowych $^2S_{1/2} F = 1$ i $F = 2$ z jednakowym prawdopodobieństwem, istnieje tendencja do zwiększania populacji stanu $^2S_{1/2} F = 2$. Optyczne pompowanie charakteryzuje się dużą efektywnością pod warunkiem odpowiedniego doboru właściwości światła pompującego, tj. polaryzacji, natężenia, rozkładu widmowego.

BUDOWA ATOMOWYCH WZORCÓW CZĘSTOTLIWOŚCI

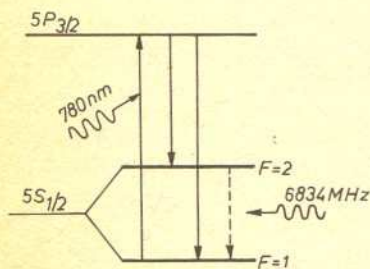
Najszerze zastosowanie w badaniach naukowych i technice znajdują trzy typy wzorców:

- 1) wzorce z wiązką atomową cezu,
- 2) masery wodorowe,
- 3) wzorce z pompowaniem optycznym w parach rubidu.

Wzorce z wiązką cezową oraz z pompowaniem optycznym w parach rubidu należą do grupy wzorców typu biernego. We wzorcach tych pożądanе przejście energetyczne jest wymuszane przez zewnętrzne pole mikrofalowe o częstotliwości odpowiedniej dla danego przejścia. Natomiast maser wodorowy jest tzw. wzorcem czynnym, w którym energia danego przejścia stanowi użytkowy sygnał o częstotliwości wzorcowej.

Wzorec z wiązką atomową cezu

Na rys. 4 pokazano schemat funkcjonalny wzorca atomowego z wiązką cezu. W naczyniu próżniowym jest umieszczone źródło wiązki atomowej. W wyniku przestrzennej separacji atomów w niejednorodnym polu wielobiegunowego magnesu A, do rezonatora mikrofalowego wchodzi wiązka atomów znajdujące się np. w niższym stanie energii. W rezonatorze pod wpływem pola mikrofalowego (o częstotliwości $f = 9,2 \text{ GHz}$) część atomów przechodzi do stanu wzbudzonego (stosowana jest również inna geometria wiązki atomowej niż pokazana na rys. 4, która pozwala na wykorzystanie obu zjawisk emisji i absorpcji mikrofal przez atomy).



Rys. 3. Ilustracja pompowania optycznego.

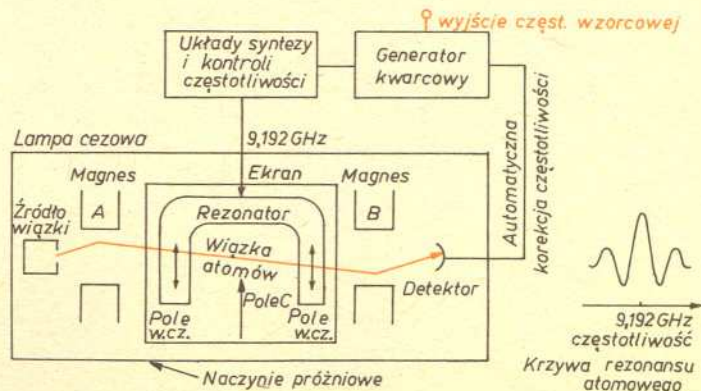


Rozwiązanie zadania M 313

Całkowitymi pierwiastkami równania $p(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_kx^k = 0$ o całkowitych współczynnikach mogą być tylko dzielniki a_0 — w naszym przypadku „tylko” $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5, \pm 6, \pm 8, \pm 9, \pm 10, \pm 12, \pm 15, \pm 18, \pm 20, \pm 24, \pm 30, \pm 36, \pm 40, \pm 45, \pm 60, \pm 72, \pm 90, \pm 120, \pm 180, \pm 360$: 48 możliwości! Możemy sobie jednak zaoszczędzić rachunków, zauważając, że jeżeli x_0 jest całkowitym pierwiastkiem równania $p(x) = 0$, a m — dowolną liczbą całkowitą, to $p(m) = p(m) - p(x_0) = a_0 + \dots + a_k m^k - a_0 - \dots - a_k x_0^k = a_1(m - x_0) + \dots + a_k(m - x_0) \cdot (m^{k-1} + m^{k-2}x_0 + \dots + x_0^{k-1})$ dzieli się przez $m - x_0$.

Weźmiemy $m = 1$ i $m = -1$. Mamy: $1^3 - 13 \cdot 1^2 - 6 \cdot 1 - 360 = -378$, a więc każdy całkowity pierwiastek x_0 naszego równania musi spełniać warunek $(x_0 - 1) | 378 = 2 \cdot 27 \cdot 7$ — warunek ten spełniają tylko liczby 2, 3, 4, 8, 10, 15, -1, -2, -5, -6, -8, -20. Z kolei podstawiając $m = -1$ otrzymujemy $(x_0 + 1) | 368 = 16 \cdot 23$ co ogranicza zbiór możliwych pierwiastków do $\{3, 15, -5\}$.

Teraz już łatwo sprawdzić, że jedynym pierwiastkiem całkowitym jest 15 — przy zwykłym sprawdzaniu doszlibyśmy do niego prawdopodobnie nie wcześniej niż za dziesiątą próbą.



Rys. 4. Schemat funkcjonalny atomowego cezowego wzorca częstotliwości.



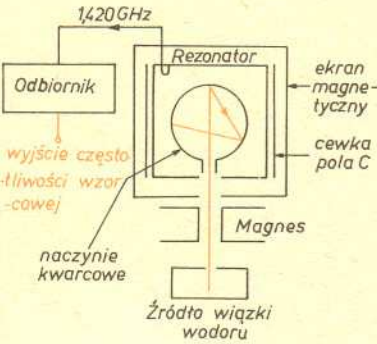
W obszarze pobudzenia zastosowano stałe pole magnetyczne C , w celu rozszczepienia poziomów energetycznych w atomach tak, aby móc wywołać pożądane przejścia. Magnes B , taki sam jak magnes A , wydziela atomy pobudzone i kieruje je do detektora. Rejestrowane natężenie wiązki jest proporcjonalne do prawdopodobieństwa wymuszenia przez pole mikrofalowe przejścia energetycznego. Przebieg tego prawdopodobieństwa jako funkcji częstotliwości jest krzywą rezonansu atomowego. Jej szerokość w budowanych współcześnie wzorcach zawiera się w granicach od 30 do 1300 Hz.

W skład urządzenia wzorca wchodzi ponadto wysokostabilny generator kwarcowy oraz układ syntezy częstotliwości, w którym sygnał z generatora jest przetwarzany na sygnał mikrofalowy. Sygnał z wyjścia lampy cezowej służy do automatycznej korekcji częstotliwości generatora kwarcowego w ten sposób, aby częstotliwość pola mikrofalowego była równa częstotliwości środkowej linii rezonansu atomowego. W ten sposób częstotliwość generatora kwarcowego jest określona głównie przez parametry lampy cezowej i jest częstotliwością wzorcową.

Maser wodorowy

W maserze wodorowym (rys. 5) zachodzą przejścia między poziomami $F = 1, m_F = 0$ i $F = 0, m_F = 0$. Sześciobiegunowy magnes separuje atomy znajdujące się w tych dwóch stanach tak, że do rezonatora mikrofalowego wchodzi wiązka zawierająca atomy w stanie $F = 1, m_F = 0$ (oraz atomy w stanie $F = 1, m_F = 1$).

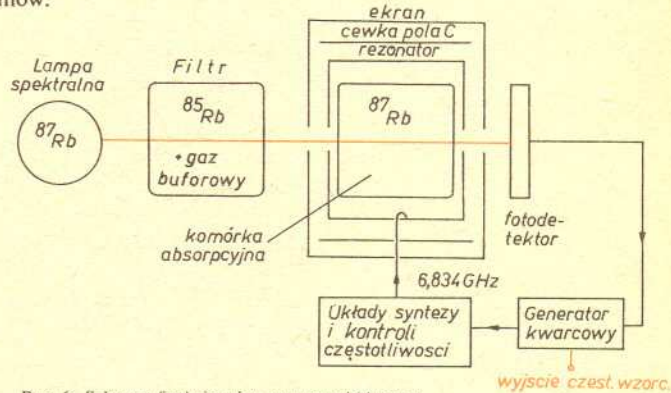
Kiedy rezonator mikrofalowy jest dostrojony do częstotliwości przejścia, oraz natężenie wiązki wchodzącej do rezonatora jest odpowiednio duże, to powstają w rezonatorze samopodtrzymujące się drgania. Wchodzące do rezonatora atomy zmieniają swój stan i emitują energię. Przy natężeniu wiązki $> 10^{12}$ atomów/s moc wyjściowa jest rzędu 10^{-13} — 10^{-12} W. Podobnie jak we wzorcu cezowym, rezonator mikrofalowy jest starannie ekranowany od zewnętrznych pól zakłócających. Przez zastosowanie kwarcowego naczynia wyłożonego wewnątrz cienką warstwą teflonu wydłużono czas oddziaływania atomów z polem mikrofalowym do 0,3 s. Dzięki temu można otrzymać wąską linię rezonansową o szerokości 1 Hz.



Rys. 5. Schemat funkcjonalny masera wodorowego.

Wzorec częstotliwości z optycznym pompowaniem w parach rubidu

Schemat funkcjonalny wzorca pokazano na rys. 6. Promieniowanie optyczne z rubidowej lampy spektralnej z rubidem ^{87}Rb przechodzi przez filtr zawierający pary rubidu ^{85}Rb . Filtr pochłania jedną ze składowych nadsztelnych linii widmowych emitowanych przez lampę spektralną. Odfiltrowane światło jest użyte do optycznego pompowania rubidu ^{87}Rb w komórce absorpcyjnej. W wyniku optycznego pompowania powstaje inwersja obsadzeń poziomów $F = 2$ i $F = 1$ struktury nadsztelnej stanu podstawowego atomów ^{87}Rb . W tym stanie komórka absorpcyjna jest przezroczysta dla przechodzącego przez nią światła, ponieważ liczba atomów zdolnych do absorpcji światła jest bardzo mała. Oddziaływanie w komórkę pola mikrofalowego wymusza przejście $F = 2, m_F = 0 \rightarrow F = 1, m_F = 0$, co prowadzi do wyrównania populacji obsadzeń poziomów.



Rys. 6. Schemat funkcjonalny wzorca rubidowego.

Jednocześnie natężenie światła przenikającego przez komórkę maleje. Zmiany natężenia światła przechodzącego przez komórkę absorpcyjną są rejestrowane w detektorze. Wpływ pola mikrofalowego ma charakter rezonansowy i jest największy, gdy jego częstotliwość jest równa częstotliwości rezonansu atomowego (około 6,834 GHz). Typowa szerokość linii rezonansowej wynosi 150 Hz.

O ZEGARACH ATOMOWYCH I INNYCH ZASTOSOWANIACH WZORCÓW ATOMOWYCH

Zegar, w najogólniejszym tego słowa znaczeniu, stanowi urządzenie do odmierzenia biegu czasu. Każdy współczesny zegar oprócz źródła zasilania zawiera trzy podstawowe elementy: regulator, sumator oraz rejestrator. Regulator zegara jest układem realizującym zjawisko okresowe, o znanej z określoną dokładnością częstotliwości, czyli niczym innym jak wzorcem częstotliwości.



Rozwiązanie zadania M 314

Mamy $AC \cos \angle CAB = AB + BC \cos 60^\circ$,

$AD \cos \angle CAB = AB$.

Zatem jeżeli $AB = 1$ i $AD = x$, to

$$\frac{AC}{AD} = \frac{x+1}{x} = 1 + \frac{1}{2} BC, \text{ stąd } BC = \frac{2}{x}.$$

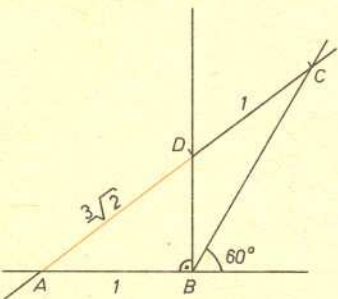
Z twierdzenia cosinusów dla $\triangle ABC$ mamy

$$AC^2 = AB^2 + BC^2 - 2 AB \cdot BC \cdot \cos \angle ABC,$$

czyli $(x+1)^2 = 1 + (2/x)^2 + 2/x$, skąd

$$x^4 + 2x^3 - 2x - 4 = 0 \text{ lub inaczej } (x+2) \times$$

$$\times (x^3 - 2) = 0. \text{ Wobec tego } AD = x = \sqrt[3]{2}.$$

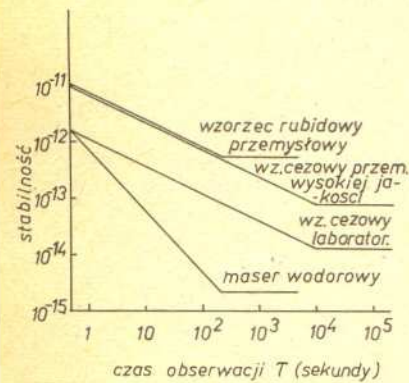


Nie jest to konstrukcja „za pomocą cyrkieli i linijki”, gdyż w tym sformułowaniu rozumiemy, że linijka jest bez podziałki i używamy jej tylko do poprowadzenia prostej przez dwa dane albo już skonstruowane punkty.

Geometria dla prawników

Wyobraźmy sobie, poruczniku, że to co ludzkość nazywa sprawiedliwością przybiera w skali naszego globu kształt powiedzmy jakiejś idealnej kuli o niezmiennych parametrach. Otóż jeśli gdzieś w jakimś zakątku Ziemi zwiędza niesprawiedliwość, to oznacza wyłącznie to, że tylko w tym miejscu nie ma sprawiedliwości. Natomiast w tym samym czasie, gdzieś tej sprawiedliwości, jako absolutu dobra w stosunkach międzyludzkich, jest po prostu więcej.

(Henryk Kurta, *Mors ultima ratio*, KAW 1979)



Rys. 7. Stabilność częstotliwości różnych wzorców atomowych.



Sumator zlicza kolejne okresy drgań wzorcowego przebiegu okresowego i przedstawia je w konwencjonalnych jednostkach czasu np. sekundach, minutach i godzinach. Odbyna się to w ten sposób, że częstotliwość wzorcowa jest najpierw obniżana wiele razy tak, aby uzyskać przebieg o częstotliwości 1 Hz, czyli o okresie 1 sekundy. Następnie z tego przebiegu jest wytworzony ciąg impulsów o takim samym czasie powtarzania i te z kolei są zliczane za pomocą elektronicznych liczników. Wskazania sumatora notuje rejestrator.

Zegar, w którym zastosowano wzorec atomowy, jest nazywany zegarem atomowym. Do ich budowy są stosowane zwykle wzorce najwyższej klasy. Są to wzorce laboratoryjne, tzw. wzorce pierwotne, konstruowane i eksploatowane przez instytuty i ośrodki zajmujące się pomiarami czasu i częstotliwości np. National Bureau of Standards (USA), National Physical Laboratory (W. Brytania), Physikalisch Technische Bundesanstalt (RFN) i inne. Wzorcom tym stawia się najwyższe wymagania co do stabilności (maksymalna względna zmiana częstotliwości w określonym czasie), odtwarzalności i niezawodności. Żąda się także, aby wykorzystywana częstotliwość leżała jak najbliżej częstotliwości rezonansowej odosobnionego atomu. Zagadnienie wymiarów, poboru mocy nie jest tu sprawą najważniejszą. Wzorce laboratoryjne wtórne są stosowane do celów technicznych w laboratoriach instytutów naukowo-badawczych, przemysłowych, ośrodkach radionawigacyjnych.

W rozwiązaniach konstrukcyjnych są one prostsze i mniejsze. Pierwszy polski wzorec laboratoryjny (z wiązką atomów cezu) został zbudowany w IPPT PAN w 1966 roku, a obecnie kolejny model tego wzorca zainstalowany w Instytucie Łączności służy do kontroli emisji Krajowej Służby Częstotliwości Wzorcowej.

Atomowe wzorce są budowane również w wersji przemysłowej i jako takie służą głównie do synchronizacji różnego rodzaju urządzeń i systemów nawigacyjnych, radiokomunikacyjnych, komunikacji satelitarnej. Są one produkowane seryjnie przez nielicznych producentów, np. firmę Hewlett-Packard (USA), Rhode-Schwarz (RFN), Thomson-CSF (Francja), Nippon-Electronics (Japonia). Dla tego typu wzorców istotne są małe rozmiary, ciężar, pobór mocy zasilania, duża niezawodność, odporność na trudne warunki pracy. Seryjnie produkowane wzorce cezowe posiadają wymienną lampę cezową podobną pod względem eksploatacji do lamp radiowych. Lampa ta zawiera źródło, detektor oraz układy separacji i pobudzania wiązki atomowej. W Polsce kilka wzorców seryjnej produkcji posiada Polski Komitet Normalizacji i Miar.

W chwili obecnej wzorce cezowe osiągnęły najwyższy poziom techniczny. Charakteryzują się one bardzo dobrą odtwarzalnością, niezawodnością oraz długoterminową stabilnością i pracują najczęściej w układzie zegara atomowego. Na rys. 7 przedstawiono wykresy stabilności dla wzorca z wiązką atomów cezu, masera wodorowego oraz wzorca z optycznym pompowaniem w parach rubidu. Dla czasów obserwacji τ większych niż kilka sekund, najlepszą stabilność posiada maser wodorowy. Ze względu na skomplikowaną budowę, duże rozmiary i wysoki koszt, masery znajdują głównie zastosowanie w specjalnych przypadkach, gdzie jest wymagana doskonała stabilność średnioterminowa np. w radioastronomii (interferometri o dużej bazie), radiokomunikacji dalekiego zasięgu. Wzorce rubidowe posiadają podobną do wzorców cezowych stabilność krótko- i średnioterminową, jednak ich odtwarzalność jest mała. Natomiast bardzo ważną zaletą są małe gabaryty i ciężar, prosta budowa, gotowość do pracy w ciągu 10 minut po włączeniu do źródła zasilania.

ATOMOWA SKALA CZASU

Wielka równomierność chodu zegarów atomowych upoważnia do utworzenia atomowej skali czasu. Międzynarodową atomową skalę czasu TAI wyprowadza Międzynarodowe Biuro Czasu (BIH-Bureau Internationale de l'Heure) w Paryżu na podstawie wyników pomiarów kilku przodujących laboratoriów.

Skala ta wynika z sumowania okresów przebiegu o częstotliwości wzorcowej. Na Generalnej Konferencji Miar w 1967 roku przyjęło, że sekunda jest czasem trwania 9192 631 770 okresów promieniowania odpowiadającego przejściu między dwoma poziomami w strukturze nadsubtelnej stanu podstawowego atomu ^{133}Cs .

Początek atomowej skali czasu został wyznaczony na moment 0 godz., 0 min., 0 s, dnia 1 stycznia 1958 roku czasu uniwersalnego (średniego czasu słonecznego Greenwich).

W życiu codziennym posługujemy się czasem koordynowanym, sygnały nadawane przez radiostacje oznajmiają właśnie ten czas. Skalą czasu koordynowanego jest skala czasu atomowego. Czas uniwersalny upływa natomiast w (niejednostajnym) tempie ruchu obrotowego Ziemi. W związku z tym ustalono, że wskazania czasu uniwersalnego koordynowanego UTC mogą się różnić od jednoczesnych wskazań czasu atomowego TAI o równą liczbę sekund. Zmiany różnicy TAI-UTC są dokonywane zwykle 30 czerwca lub 31 grudnia, tak aby oddalenie czasu koordynowanego od czasu uniwersalnego było nie większe niż 1 sekunda. Ostatniej zmiany dokonano w nocy z 30 czerwca na 1 lipca 1982 roku. Minuta kończąca czerwiec liczyła wtedy na południku zerowym 61 sekund. W Polsce natomiast dodatkową sekundę dołączono do minuty przed godziną drugą czasu letniego w dniu 1 lipca. Od tego momentu różnica TAI-UTC wynosi +21 sekund.