

# Dlaczego potrzebujemy polskiej miniaturowej referencji czasu dla aplikacji kosmicznych i wojskowych?



**Paweł Knapkiewicz**

*Dr hab. inż., profesor uczelni*

*Kierownik Centrum Badań Kosmicznych  
Wydziału Elektroniki, Fotoniki i  
Mikrosystemów; Politechnika Wrocławska;  
Wydział Elektroniki, Fotoniki i  
Mikrosystemów*

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono przegląd rozwiązań zegarów atomowych powstałych w czołowych zespołach naukowych i komercyjnych świata. Zaproponowano budowę polskiego zegara atomowego podając nazwy jednostek naukowych, które mogą w tym uczestniczyć.

**Słowa kluczowe:** *Polski zegar atomowy*

Aplikacje precyzyjnych referencji czasu i częstotliwości są rozległe. Pierwszą z nich jest telekomunikacja, gdzie rozwój kolejnych technologii (4G – 5G, itd.) możliwy jest wyłącznie dzięki zastosowaniu referencji atomowych. Umożliwiają one zawężanie pasma (większa ilość danych) oraz przyspieszanie transmisji. Dodatkowo umożliwiają zastosowanie kryptografii danych bazujących na kodowaniu sygnału w domenie czasu, co jest skuteczniejsze w porównaniu do algorytmów matematycznych kodowania. Obecnie każda stacja bazowa operatorów telefonii komórkowej posiada referencję atomową (lub stabilizowaną termicznie referencję kwarcową - te podlegają wymianie) i ci odbiorcy stanowią największy rynek dla tego produktu.

Drugą najważniejszą aplikacją jest precyzyjna nawigacja. Dokładny pomiar czasu jest kluczowy do precyzyjnego wyznaczania położenia obiektów. Dla przykładu, komercyjnie dostępne rozwiązania nawigacji samochodowej wykorzystują kwarcowe referencje częstotliwości ( $10^{-6}$  s/s), co pozwala na oszacowanie położenia obiektu z dokładnością  $\pm 10$  m. Zastosowanie stabilizowanych ter-

micznie referencji kwarcowych ( $10^{-8}$  s/s) pozwala zwiększyć szacowanie pozycji do  $\pm 2$  m. Natomiast zastosowanie referencji atomowych ( $10^{-11}$  s/s) zwiększa precyzję do  $\pm 1$  cm. Jest to związane z tym, że o precyzyjnej nawigacji wymagany jest bardzo dokładny pomiar czasu przelotu wiązki radiowej od urządzenia na ziemi do satelity (część kilku satelitów) i z powrotem do urządzenia naziemnego. Błędy w szacowaniu czasu skutkują nieprecyzyjną nawigacją.

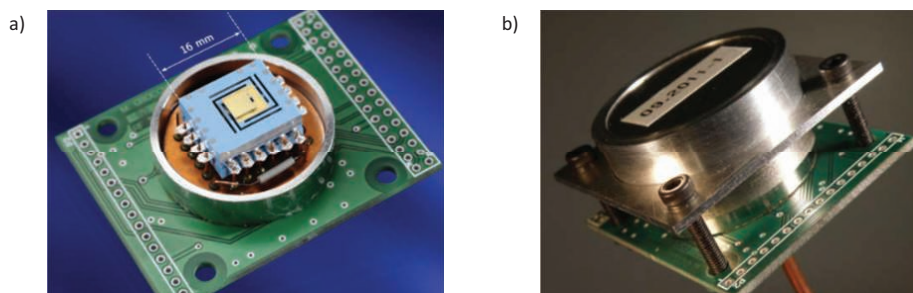
Jest więc oczywiste, że precyzyjne systemy nawigacji znajdują zastosowanie w rozwiązaniach militarnych, co stanowi trzeci obszar aplikacji. Trzeba jasno powiedzieć, że każdy nowoczesny system uzbrojenia wykorzystuje atomową referencję czasu.

Patrząc od innej strony, dopiero posiadanie miniaturowej referencji czasu i częstotliwości umożliwia budowanie zaawansowanych i precyzyjnych systemów do nawigacji i komunikacji w domenie kosmicznej i wojskowej.

Komponent w postaci miniaturowej referencji czasu i częstotliwości jest więc komponentem krytycznym w budowie systemów. Istniejący pro-

ducenci (dostępne rozwiązania: Izrael, USA) mogą nie być zainteresowani udostępnianiem krytycznej technologii, tym samym blokowany jest potencjał wzrostu technologicznego w Europie. Ten stan rzeczy został dostrzeżony w UE (vide raport UE) oraz w Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA), czego wyrazem są ogłoszone przez ESA konkursy na opracowanie miniaturowej referencji czasu i częstotliwości (ESA NAVISP-EL1-032 project; start date: 01/03/2020; duration: 18 months (Neuchatel & EPFL)), w tym najnowszy przetarg na CSAC (Title: TIME REFERENCE FOR PORTABLE TERMINALS USED IN SECURE COMMUNICATIONS (ARTES 4.0 4S SPL 7C.078) - RE-ISSUE, Activity Number: 1000037324). Aktualnie prowadzonych jest kilkanaście postępowań przetargowych w ESA w zakresie rozwiązań dla systemu nawigacji satelitarnej Galileo i bezpiecznej komunikacji satelitarnej i naziemnej.

W tym miejscu należy wyjaśnić subtelny różnicę pomiędzy technologią Miniature-Atomic-Clock (MAC) a Chip-Scale-Atomic-Clock (CSAC). W rozwiązaniach MAC stosuje się mikrofalowe wzbudzenie atomów rubidu. Z tego też powodu synonimem MAC



1. CSAC – efekt projektu MAC-TFC: tak zwane phisics package a) przed i b) po hermetyzacji

jest oscylator rubidowy. Kluczowym komponentem MAC jest komórka wypełniona parami metalu alkaicznego o wymiarach dostosowanych do wielkości wnęki mikrofalowej – wymiary komórki to około  $1 \text{ cm}^3$ . Komórki te najczęściej wykonywane są klasyczną metodą glass-blowing. Z uwagi na wielkość komórki i sposób wzbudzenia atomów, pobór mocy rozwiązań MAC to około 450 mW.

Rozwiązania CSAC nazywane są wymiennie „optycznym zegarem atomowym”, ponieważ wzbudzenie atomów realizowane jest przez zmodulowane wysoką częstotliwością światło laserowe. Możliwe jest wykorzystanie zarówno atomów rubidu jak i cezu, a komórki mają mniejsze rozmiary i wytwarzane są technikami MEMS. Dzięki temu pobór mocy przez CSAC to około 120 mW, jednakże rozwiązania CSAC charakteryzują się większym skomplikowaniem technicznym od MAC.

Pierwszy model CSAC przedstawił dr John Kitching z NIST w Boulder (Colorado USA) w 2004, następnie w USA ustanowiono program DARPA, którego celem było opracowanie produktu umożliwiającego konstruowanie nowych rozwiązań w obszarze telekomunikacji, informatyki i szeroko pojętego przemysłu militarnego. Pierwszy prototyp CSAC przeznaczony do wdrożenia pokazano w 2011 roku. Należy tu podkreślić, że prace Kitchinga (kilka milionów dolarów) oraz dalej prace wdrożeniowe w Symmetricom (teraz Microchip) finansowane były z programów DARPA – tylko w latach 2011-2013 Symmetricom został wsparty kwotą co najmniej ~20 milionów dolarów na

wdrożenie CSAC.

W latach 2004-2012 w kilku ośrodkach (Izrael, Rosja, Chiny i UE) podjęto równoległe do amerykańskich prace nad CSAC. Niektóre z nich doprowadziły do powstania rodzimych MAC lub CSAC z tym, że wyniki prac nie są w klarowny sposób zrelacjonowane w literaturze przedmiotu.

Wg analizy Komisji Europejskiej [1] (Raport UE powołuje się i odnosi do badań dr. hab. inż. Knapkiewicz, cytując artykuł: Knapkiewicz Pawel, Technological Assesment of MEMS Alkali Vapor Cells for Atomic References, *Micromachines* 10(1), 2019; doi:10.3390/mi10010025), oraz własnej, aktualnie dostępne rozwiązania rezonatorów rubidowych (MAC) pochodzą z Izraela (jeden dostawca) lub ze Stanów Zjednoczonych Ameryki (pięciu dostawców). W Europie jedyne rozwiązanie jest w ofercie grupy Safrane. Dostępne MAC charakteryzują się stabilnością krótkoczasową (w zależności od rozwiązania) w zakresie od  $1,5 \cdot 10^{-11}$  do  $6 \cdot 10^{-11} = 1 \text{ s}$ .

Firma Microchip (USA, wcześniej Symmetricom / Microsemi) jest jedyną na świecie posiadającą w stałej ofercie sprzedaży CSAC o nazwie handlowej SA65 (następca SA45). Europa nie posiada własnego rozwiązania CSAC.

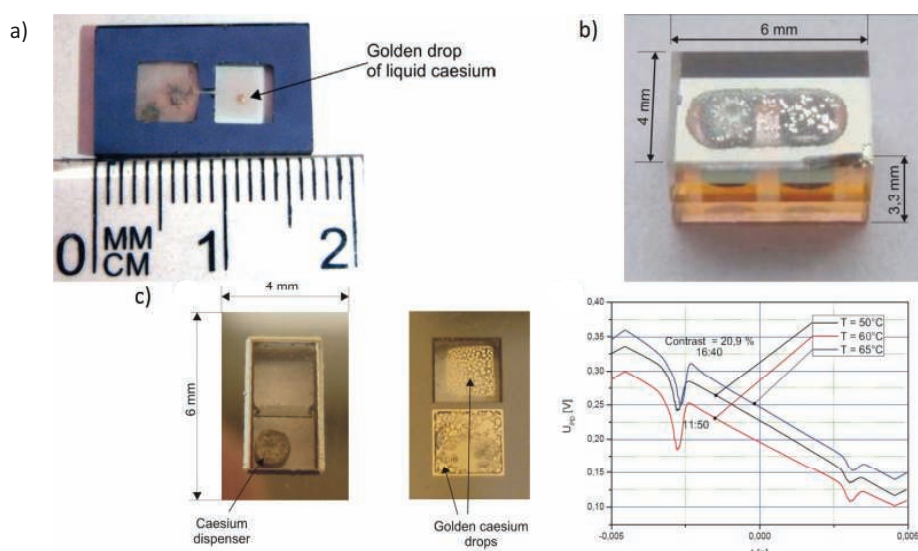
Wśród zrealizowanych projektów nad CSAC na uwagę zasługuje powołany przez Wspólnotę Europejską w ramach PR6 projekt MAC-TFC (Miniature Atomic Clock for Time and Frequency Measurements), lider FEMTO-ST, zrealizowany w latach 2008-2014 przez międzynarodowe konsorcjum z udziałem ośrodków naukowych i firm z Francji, Polski,

Szwajcarii i Niemiec. Projekt zakończono z sukcesem, przedstawiając miniaturowy cezowy zegar atomowy CSAC o stabilności krótkoczasowej  $5 \cdot 10^{-11} = 1 \text{ s}$  (Rys. 1).

W projekcie MAC-TFC zastosowano unikalną technikę wytwarzania tzw. optycznej komórki MEMS wypełnionej ściśle kontrolowaną ilością cezu oraz gazu buforującego. Zastosowano tu nowatorską technikę laserowego uwalniania cezu z tzw. dyspensera cezowego, którą opracowano w FEMTO-ST na podstawie koncepcji zespołu polsko-francuskiego (Dziuban, Walczak, Górecki) [2]. Ta metoda stała się podstawą technologiczną europejskiego CSAC, a w projekcie MAC-TFC cezowa komórka optyczna MEMS opracowana została pod kierownictwem polskiego partnera projektu (Politechnika Wrocławska, Dziuban, Knapkiewicz, Rys. 2) [3- 7].

Wdrożenie efektów projektu nastąpiło w Szwajcarii, gdzie przez kolejne 15 lat zespół z UniNE Time-Frequency Laboratory (LTF, Neuchatel – ten sam, który realizował projekt MAC-TFC), przy współpracy z CSEM oraz firmą Orolia Switzerland SA, doprowadzili do powstania komercyjnej wersji rubidowego zegara atomowego. Pierwsza wzmianka o gotowości do wprowadzenia tego produktu na rynek miała miejsce w 2022 roku. Aktualnie produkt ten o nazwie handlowej mRO-50 (wersje Atomic Clock / Ruggedized) znajdują się w ofercie handlowej grupy Safrane, o czym wspomniano wcześniej.

Na podstawie analizy rynku rozwiązań CSAC należy stwierdzić, że absolutny monopol posiada firma Microchip. Według oficjalnych, publikowanych przez firmę danych, w latach 2011-2020 firma sprzedała 95 tysięcy sztuk CSAC, podając jednocześnie szacunki, że do 2029 roku zapotrzebowanie na CSAC wynosić będzie milion sztuk rocznie. Szacunki Microchip pokrywają się z inną analizą (ReportLinker, December 15, 2022), gdzie czytamy o szacowanej



2. Komórki cezowe MEMS wykonane w Politechnice Wrocławskiej: a) krzemowo-szklana komórka w skali mezo, b) komórka miniaturowa całkowicie szklana, c) komórka miniaturowa krzemowo-szklana przed i po dyspensingu cezu oraz pomiar laserowej spektroskopii absorpcyjnej z widocznymi dwoma charakterystycznymi dla cezu pikami absorpcji

wartości rynku CSAC również 745,79 miliona dolarów do 2028 roku.

Analiza konkurencyjności wskazuje, że konkurentami z Microchip w zakresie produktów MAC może być izraelski NAC1 (firma Accubate) lub mRO-50 (grupa Safrane).

Problem budowy CSAC nie jest trywialny o czym świadczy 20 lat rozwoju technologii i ogromne środki finansowe przede wszystkim w USA oraz Europie.

Zespół z Politechniki Wrocławskiej uczestniczył w projekcie MAC-TFC (2008-2011), którego celem było opracowanie pierwszego europejskiego zegara atomowego. Projekt zakończono sukcesem, ale wyniki projektu nie zostały wdrożone. Późniejsze nasze próby zainteresowania tematem w Polsce nie przyniosły skutków. Z uwagi na to, że CSAC jest absolutnie krytycznym komponentem systemów do bezpiecznego przesyłania danych i precyzyjnej nawigacji (rozwiązanie double-use), posiadanie kompetencji produkcyjnych CSAC w Polsce pozwoli osiągnąć niezależność technologiczną w zakresie miniaturowych referencji czasu i częstotliwości, w tym rozwój nowoczesnych i bezpiecznych sieci telekomunikacyjnych (w tym satelitarnych) oraz nowoczesnego uzbrojenia.

Cel ten jest osiągalny i wymaga „jedynie” śmiałej i jednoznacznej decyzji o ustanowieniu programu rozwoju CSAC w Polsce. Podkreślimy, że w Polsce posiadamy wszystkie kompetencje uprawniające nas do budowy CSAC: know-how plus zaplecze technologiczne do wytwarzania cezowych/rubidowych komórek MEMS (Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów), laboratorium czasu (Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk odział w Borowcu k/Poznania), rosnące kompetencje w zakresie produkcji optoelektroniki, aż wreszcie firmy zdolne wykorzystać CSAC do budowy systemów satelitarnych i wojskowych. ◀

### Materiały źródłowe

- [1] Travagnin, M., Chip-Scale Atomic Clocks: Physics, technologies, and applications, EUR 30790 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021, ISBN 978-92-76-40666-2, doi:10.2760/278540, JRC125394.
- [2] Dziuban, J.; Gorecki, C.; Giordano,

V.; Nieradko, L.; Maillotte, H.; Moraja, M. Procédé de fabrication d'une cellule à gaz active pour l'horloge atomique à gaz ainsi obtenue. Zgłoszenie patentowe, French Patent 06/09089, 17 Octobre 2006

- [3] Knapkiewicz Paweł, Dziuban Jan, Walczak Rafał, Mauri Luca, Dziuban Piotr, Gorecki Christophe: MEMS caesium vapour cell for European micro-atomic-clock, Procedia Engineering [Dokument elektroniczny], 2010, vol. 5, s. 721-724, Eurosensors XXIV, Linz, Austria, September 5-8, 2010
- [4] Knapkiewicz Paweł, Dziuban Jan, Gorecki Christophe, Dziuban Piotr, Walczak Rafał, Mauri Luca: Komórka cezowa MEMS dla mikrozegara atomowego, Elektronika (Warszawa). 2010, R. 51, nr 6, s. 82-85
- [5] C. Gorecki, Development of first European chip-scale atomic clocks: technologies, assembling and metrology, Procedia Engineering 47 (2012), 898-903
- [6] Boudot Rodolphe, Miletic Danijela, Dziuban Piotr, Affolderbach Christoph, Knapkiewicz Paweł, Dziuban Jan, Miletic Gaetano, Giordano Vincent, Gorecki Christophe, First-order cancellation of the Cs clock frequency temperature-dependence in Ne-Ar buffer gas mixture, Optics Express. 2011, vol. 19, nr 4, s. 3106-3114, doi: 10.1364/OE.19.003106
- [7] Knapkiewicz Paweł, Technological Assessment of MEMS Alkali Vapor Cells for Atomic References, Micromachines 10(1), 2019; doi:10.3390/mi10010025