

# Systemy dla Internetu Rzeczy (35)

## Cyfrowe czujniki gazu



**Gwałtowny rozwój Internetu Rzeczy jest spowodowany w dużej mierze, przez szybki rozwój scalonych czujników różnych parametrów fizycznych: temperatury, ciśnienia, wilgotności, oświetlenia, koloru, ruchu, poziomu plynów, stężenia gazów w powietrzu i wielu innych.**

Obecnie 90% czasu życia ludzie spędzają w pomieszczeniach takich jak mieszkania, biura, szkoły i samochody [1]. Kluczowymi parametrami dla zapewnienia komfortu w pomieszczeniach są: wilgotność i temperatura, poziom lotnych związków organicznych (VOC), poziom dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ) oraz poziom pyłów (PM). Pomiar wilgotności i temperatury został omówiony w artykule „Scalone czujniki cyfrowe wilgotności i temperatury” [S32].

Powszechne stosowanie nowych produktów i materiałów budowlanych spowodowało zwiększenie stężenia zanieczyszczeń w pomieszczeniach, w szczególności lotnych związków organicznych. Typowe źródła zanieczyszczeń powietrza zostały pokazane na rysunku tytułowym [2]. Wiele z tych związków ma wpływ na dobre samopoczucie i produktywność, a ich wysokie stężenie może powodować bóle głowy, podrażnienie oczu lub zawroty głowy. Dwutlenek węgla jest kluczowym wskaźnikiem jakości powietrza w pomieszczeniach. Dzięki nowym standardom energetycznym i lepszej izolacji domy stały się coraz bardziej energooszczędne, ale jakość powietrza może się gwałtownie pogorszyć.

W pojazdach użytkowych coraz częściej instalowane są czujniki gazu i cząstek stałych, aby zapewnić pasażerom powietrze o wysokiej jakości. Dotychczasowy powszechny scenariusz ich zastosowania

polega na tym, że gdy czujnik w samochodzie wykryje wysokie stężenie dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ) i lotnych związków organicznych (VOC), aktywuje system klimatyzacji. Nowy scenariusz zastosowania polega na tym, że gdy czujnik zewnętrzny wykryje zewnętrzne zanieczyszczenie środowiska to powiadamia o zamknięciu systemu wentylacji.

Cyfrowe czujniki gazu wytwarzane są głównie z zastosowaniem kilku technologii:

- MOX/MEMS – Scalone układy w technologii CMOS oraz MEMS z zastosowaniem czujników z tlenkiem metalu MOX (Metal – Oxide),
- NDIR (Non Disperse Infra Red) – Układy pomiaru stężenia dwutlenku węgla poprzez pomiar stopnia pochłaniania światła podczerwonego,
- PAS (Photoacoustic Spectroscopy) – Czujniki z wykorzystaniem efektu fotoakustycznego.

Na rynku czujników gazu dużo się ostatnio dzieje. Szczególnie szybki rozwój nastąpił w dziedzinie pomiarów jakości powietrza w pomieszczeniach. Mniejsze innowacyjne firmy są przejmowane przez dużych producentów. I tak np.: SGX Sensortech trafiła do firmy Amphenol, Integrated Device Technology (IDT) trafiła do firmy Renesas, Cambridge CMOS Sensors (CCS) trafiła do firmy AMS.

## Lotne związki organiczne (VOC)

Lotne związki organiczne VOC (*Volatile Organic Compounds*) są emitowane jako gazy z niektórych ciał stałych lub cieczy. Mogą być wydzielane przez szeroką gamę produktów, w tym farby i lakiery, rozpuszczalniki i środki czyszczące, produkty gospodarstwa domowego, środki czyszczące i dezynfekujące, materiały budowlane (sklejka i płyta wiórowa) oraz meble i urządzenia biurowe takie jak kopiarki, taśmy i kleje.

Istnieją różne klasyfikacje VOC [3]. Najczęściej stosowana jest definicja Światowej Organizacji Zdrowia (WHO). Suma wszystkich VOC jest określana jako TVOC (*Total Volatile Organic Compounds*). Mogą powodować podrażnienie oczu, nosa oraz gardła, a także bóle głowy, utratę koordynacji i nudności. Mogą również przyczyniać się do uszkodzenia wątroby, nerek oraz centralnego układu nerwowego. Niektóre są podejrzewane o wywoływanie nowotworów.

## Pomiary równoważnika dwutlenku węgla eCO<sub>2</sub>

Wiele czujników nie mierzy bezpośrednio stężenia CO<sub>2</sub>, ale oblicza jego stężenie na podstawie pomiaru stężenia wodoru, czyli w praktyce TVOC [2]. W powietrzu wydychanym przez ludzi znajduje się znaczące stężenie wodoru (ok. 10 ppm) i CO<sub>2</sub> (ok. 4%). Człowiek jest jedynym głównym źródłem wodoru i CO<sub>2</sub> w pomieszczeniach zamkniętych. W pomieszczeniach występuje stała proporcja pomiędzy TVOC oraz CO<sub>2</sub>. W takim przypadku istnieje możliwość obliczenia stężenia równoważnego (*equivalent*) dwutlenku węgla na podstawie TVOC, oznaczane typowo jako eCO<sub>2</sub> (lub CO<sub>2</sub>eq).

## Jakość powietrza w pomieszczeniach (IAQ)

Obecnie nie ma globalnego standardu definiującego IAQ (*Indoor Air Quality*) [3]. Niektóre kraje mają lokalne podejście i opublikowały badania, które podają wskaźniki czystego powietrza i jego implikacje. „Umweltbundesamt” (UBA, *German Federal Environmental Agency*) to niemiecka agencja ochrony środowiska, która od wielu lat prowadzi badania dotyczące powietrza w pomieszczeniach i TVOC. Na podstawie badań z 2007 r. określiła standard pomiarów TVOC oraz zalecenia dotyczące jakości powietrza w pomieszczeniach. Są one bardzo przydatne, ponieważ nie tylko identyfikują poziomy potencjalnych zagrożeń, ale także dostarczają wskazówek, jakie działania są zalecane na podstawie tych poziomów TVOC. Miejsca występowania zanieczyszczeń powietrza określanych zgodnie ze standardem TVOC/UBA zostały pokazane na rysunku tytułowym [1].

## Czujniki MOX/MEMS

Nowoczesne czujniki z tlenkiem metalu MOX (*Metal Oxide*) wykorzystują mikroobróbkę krzemu, aby stworzyć solidną, ale izolowaną termicznie mikro płytę (*micro-hotplate*), służącą do podgrzewania. Daje to wyjątkowo niskie zużycie energii, miniaturowe rozmiary i niskie ceny. Typowymi materiałami MOX są domieszkowane materiały takie jak SnO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub> i TiO<sub>2</sub>, itp. W podwyższonych temperaturach cząsteczki gazu mogą adsorbować się na powierzchni MOX i generować wolne nośniki. Wynikową zmianę rezystancji można zmierzyć na dwóch elektrodach. Sygnał czujnika silnie zależy od stężeniu gazów obecnych w powietrzu, użytych materiałów, technologii produkcji, czasu i temperatury. Wszystkie związki organiczne katalitycznie reagują na powierzchni MOX i mogą powodować spadek lub wzrost rezystancji.

Nowe czujniki cyfrowe z zastosowaniem technologii MEMS, które pojawiły się na rynku w ciągu ostatnich kilku lat zapewniają mniejsze rozmiary, niższe ceny i wbudowane kalibrowanie sygnałów. Ta nowa klasa czujników umożliwia dodanie elektronicznego poczucia „zapachu” do szerokiej gamy produktów zorientowanych na konsumenta (w tym urządzeń przenośnych, takich jak smartfony), bez specjalnego doświadczenia ani wiedzy wymaganej przez użytkownika końcowego.

Zaletą czujników MOX/MEMS jest wykrywanie (prawie) wszystkich lotnych związków organicznych (VOC), mały rozmiar i niska cena. Nie mierzą one jednak bezpośrednio stężenia CO<sub>2</sub>.

## Technologie CMOSens oraz MOXSens firmy Sensirion

Założona w 1998 r. Firma Sensirion jest wiodącym producentem wysokiej jakości czujników i rozwiązań czujnikowych do pomiaru i kontroli wilgotności, przepływu gazu i cieczy. Sukces firmy opiera się na innowacyjnej technologii CMOSens, która integruje płytki czujników i elektronikę analityczną w jednym półprzewodniku [4]. Oznacza to, że wysokiej jakości i niedrogie czujniki mogą być produkowane masowo.

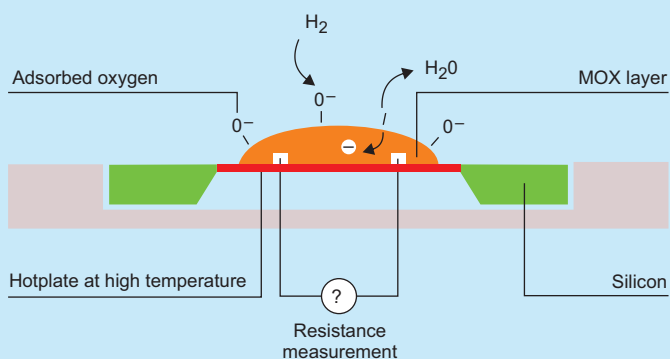
Czujniki gazu z tlenkiem metalu bazują na warstwie cząstek tlenku metalu umieszczonej między dwiema elektrodami na mikro płycie grzejnej (**rysunek 1**). Podgrzanie tlenku metalu do wysokiej temperatury powoduje powstawanie ujemnie naładowanych cząstek tlenu na powierzchni tlenku metalu. Powierzchniowe formy tlenu reagują z gazami otoczenia, uwalniają elektrony do tlenku metalu co powoduje zmianę oporności elektrycznej warstwy tlenku metalu. Zmiana rezystancji jest mierzona między dwiema elektrodami i zależy bezpośrednio od stężenia gazu w otoczeniu.

Technologia MOXSens łączy platformę CMOSens z technologią wykrywania opartą na tlenku metalu w czujniku gazu. Technologia MOXSens umożliwia wysoce czułe i niezawodne pomiary typowych zanieczyszczeń w pomieszczeniach, takich jak lotne związki organiczne lub wodór jako równoważnik CO<sub>2</sub>. Czujniki gazu z technologią MOXSens firmy Sensirion mierzą rezystancję tlenku metalu jako funkcję stężenia gazu w otoczeniu i dostarczają w pełni skalibrowane cyfrowe sygnały jakości powietrza w pomieszczeniach.

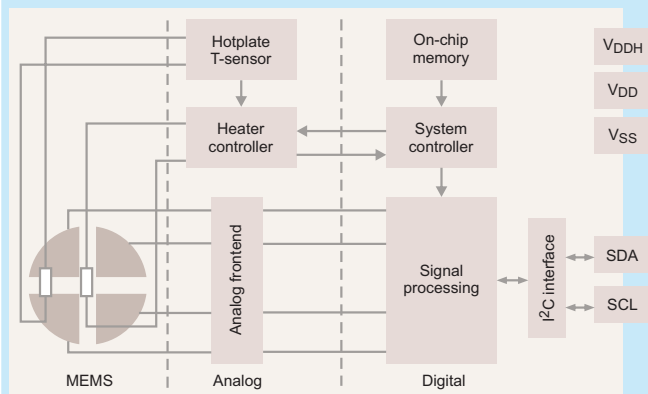
Technologia MOXSens firmy Sensirion zapewnia doskonałą odporność na zanieczyszczenie powietrza siloksanami, co powoduje wyjątkową długoterminową stabilność i dokładność. W tradycyjnych czujnikach półprzewodnikowych z tlenkiem metalu siloksany, o mniejszym ciężarze cząsteczkowym, łatwo ulegają rozkładowi pod wpływem temperatury na dwutlenek silikonu (SiO<sub>2</sub>) podczas pracy elementu czujnikowego. Cząsteczka SiO<sub>2</sub> tworzy warstwę ochronną na membranie. Ta warstwa ochronna pogarsza dostęp gazu do membrany i zmniejsza czułość czujnika na gaz i wydłuża czas odpowiedzi. Zmiany są nieodwracalne. Długotrwałe działanie siloksanów powoduje uszkodzenie czujnika. Badania firmy Sensirion wykazały, że po czasie 10 lat wystawienia na działanie siloksanów dokładność pracy czujników prawie się nie zmieniła.

Największą zaletą czujnika gazu z tlenkiem metalu jest wysoka czułość na wiele różnych związków gazowych. Próg wykrywalności waha się wokół bardzo małych stężeń, w zależności od mierzonych gazów, od kilku części na milion (ppm) do części na miliard (ppb).

Układy CMOSens to inteligentne systemy mikrosensorowe o wysokim stopniu integracji i funkcjonalności. Zapewnia to analogowe i cyfrowe przetwarzanie sygnału, które jest zintegrowane w układzie



Rysunek 1. Sposób działania czujnika w technologii MOXSens [4]



Rysunek 2. Schemat blokowy czujnika SGP30 firmy Sensirion [6]

półprzewodnikowym wraz z komponentem czujnika. Układy scalone zapewniają autotesty, pracę przy niskiej mocy oraz wbudowaną linearyzację, cyfryzację, kompensację temperatury oraz pamięć do przechowywania danych kalibracyjnych. Obecny wysoki poziom funkcjonalności i inteligencji wynika z wieloletnich prac rozwojowych.

Czujniki tlenku metalu CMOSens, dzięki integracji w małym opakowaniu, stają się opłacalną technologią, która jest odpowiednia do masowej produkcji i wielu zastosowań.

### Czujnik jakości powietrza SGP30 firmy Sensirion

Seria najmniejszych na świecie cyfrowych czujników gazu SGP firmy Sensirion stwarza duże możliwości pomiaru jakości powietrza w pomieszczeniach [6]. Układy serii SGP są zintegrowane w bardzo małej wodoodpornej i pyłoszczelnej obudowie DFN 2,45×2,45×0,9 mm z interfejsem I<sup>2</sup>C i w pełni skalibrowanymi sygnałami wyjściowymi niosącymi informację o jakości powietrza.

Firma Sensirion dostarcza darmowy kod programu do obsługi łącza I<sup>2</sup>C układów serii SGP zarówno z wykorzystaniem sprzętowego modułu peryferyjnego mikrokontrolera jak również z zastosowaniem wyprowadzeń GPIO.

Czujnik jakości powietrza SGP30 firmy Sensirion to pierwszy czujnik VOC odporny na siloksany [6] dzięki zastosowanej technologii MOXSens. Również jako pierwszy integruje cztery elementy czujnikowe (piksele) w jednym układzie scalonym (rysunek 2). Mikropłytkę z kontrolowaną temperaturą zapewnia stabilną pracę czterech pojedynczych pikseli czujnikowych.

Zastosowane w układzie algorytmy przetwarzania do kalibracji poziomu odniesienia (*baseline*), temperatury i wilgotności przekształcają sygnały pikseli czujnika we wstępnie przetworzone i skalibrowane sygnały cyfrowe, takie jak stężenie VOC w otoczeniu i równoważne stężenie CO<sub>2</sub>.

Bezprecedensowe połączenie stabilności długoterminowej i technologii wielu pikseli sprawia, że SGP30 jest idealnym wyborem do monitorowania jakości powietrza w pomieszczeniach w aplikacjach mobilnych, inteligentnych domach i urządzeniach.

### Parametry układu SGP30

- Metoda pomiarowa: Półprzewodnikowy scalony czujnik gazu w technologii MOXSens oraz CMOSens,
- Wyjście: TVOC [ppb], CO<sub>2</sub>eq [ppm],
- Zakres: TVOC: 0...60000 ppb, CO<sub>2</sub>eq: 400...60000 ppm,
- Dokładność: 15% wartości mierzonej typ.,
- Rozdzielczość: 0,2% wartości mierzonej typ.,
- Stabilność długoterminowa: typ 1,3% wartości maksymalnej na rok,
- Typowa częstotliwość pomiarów: 1 sps ,
- Maksymalna częstotliwość pomiarów: 40 sps,
- Kompensacja poziomu odniesienia: Wewnętrzny algorytm kompensacji (dla typowej częstotliwości pomiarów),



Rysunek 3. Widok budowy wewnętrznej czujnika SGP30 firmy Sensirion [7]

- Kompensacja zmian wilgotności: Tak, przy zastosowaniu wewnętrznego czujnika,
- Napięcie zasilania: 1,62...1,98 V (1,8 V typ.),
- Prąd w trakcie pomiaru: 48 mA typ. (przez czas ok. 40 ms),
- Prąd uśpienia: 2 μA typ.,
- Interfejs cyfrowy: I<sup>2</sup>C 1,8 V typ.,
- Słowo danych: 16b plus CRC.
- Układ SGP30 nie obsługuje wyższego napięcia zasilania (np. 3,3 V) co w takim przypadku powoduje konieczność stosowania translatora poziomów. Planowane jest na rok 2020 udostępnienie wersji układów z wyższym napięciem pracy.

### Konstrukcja układu SGP30

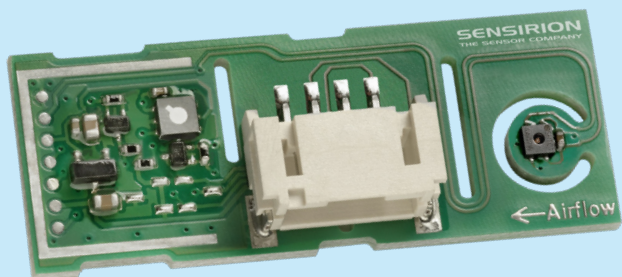
Bezpośredni widok na powierzchnię czujnika półprzewodnikowego układu SGP30 jest pokazany na rysunku 3. Aby zmniejszyć rozmiar, Sensirion umieszcza układ czujnika gazu nad układem ASIC (*Application-specific Integrated Circuit*) i pakuje je razem do obudowy. Istnieją inne zalety tego podejścia, takie jak zmniejszenie liczby i rozmiaru połączeń oraz poprawa stosunku sygnału do szumu. Pomimo generowanych wysokich prądów i temperatur zakłócenia te nie mają wpływu na pomiary sygnałów. Oprócz zarządzania grzejnikami i elektrodami układ scalony ASIC zawiera również czujnik do pomiaru temperatury mikropłytki oraz pamięć Flash do kalibracji danych.

### Czujnik jakości powietrza SGP3 firmy Sensirion

Firma Sensirion wprowadziła niedawno na rynek wielopikselowy czujnik gazu SGPC3 niskiej mocy [6]. Czujnik mierzy tylko poziom VOC. Jest umieszczony w takiej samej małej obudowie co SGP30 ale wyróżnia się bardzo niską mocą zasilania. Średni prąd SGPC3 wynosi 0,98 mA w trybie niskiej mocy (pomiar co 2 s) oraz 0,065 mA w trybie ultra niskiej mocy (pomiar co 30 s). Pozostałe parametry są takie same jak dla SGP30.

### Moduł pomiaru jakości powietrza SVM30 firmy Sensirion

SVM30 to wielofunkcyjny moduł czujnika gazu, wilgotności i temperatury zawierający czujnik gazu SGP30 oraz czujnik wilgotności i temperatury SHTC1 [8]. Zintegrowany czujnik wilgotności i temperatury SHTC1 obejmuje pomiar od 0 do 100% wilgotności względnej (RH) i pomiar temperatury od -20 do 85°C, z typową dokładnością ±5% dla RH i ±1°C dla temperatury. Zastosowanie obu czujników pozwala na linearyzację i skalibrowanie sygnału jakości powietrza, a także kompensację krzyżowej czułości wilgotności. Moduł ma wymiary 39×15×7,2 mm z zamontowanym 4 nóżkowym (standardowym) gniazdkiem dla I<sup>2</sup>C. Moduł dostarczany jest w pełni stestowany i skalibrowany. Czujnik RH/T jest zamontowany na izolowanej „wypie” płytki drukowanej (rysunek 4, po prawej). Zalecane jest takie zorientowanie modułu aby powietrze napływało od strony czujnika



Rysunek 4. Moduł SVM30 firmy Sensirion [8]

RH/T. Pozwala to uniknięcie efektu podgrzewania powietrza przez pozostałą elektronikę (w tym czujnik gazu).

Moduł pracuje z typowym napięciem zasilania 5 V i prądem średnim 49 mA. Wyprowadzenia SCL i SDA modułu są wewnętrznie podciągnięte do zasilania 5 V. Moduł nie obsługuje układów zewnętrznych o niższym napięciu zasilania (np. 3,3 V) co w takim przypadku powoduje konieczność stosowania translatora poziomów.

### Czujnik jakości powietrza BME680 firmy Bosch

BME680 to pierwszy układ scalony, który integruje w jednej obudowie czujniki gazu, ciśnienia barometrycznego, wilgotności względnej i temperatury o wysokiej liniowości i dokładności [9]. Został specjalnie opracowany do zastosowań mobilnych i urządzeń do noszenia, w których gabaryty i niskie zużycie energii mają kluczowe znaczenie. BME680 gwarantuje – w zależności od trybu pracy – zoptymalizowane zużycie, długoterminową stabilność i wysoką odporność na zakłócenia elektromagnetyczne.

Układ scalony BME680 to kilka układów w jednym: czujnik ciśnienia i temperatury (jak w układzie BMP280) z rozszerzeniem o czujnik wilgotności (jak w układzie BME280) i z dodatkowym czujnikiem gazu [10].

Czujnik wilgotności względnej jest wykonany w technologii MEMS z zastosowaniem pomiaru zmian pojemności kondensatora z polimerową folią [S32]. Czujnik ciśnienia barometrycznego jest wykonany w technologii MEMS z zastosowaniem pomiaru rezystancji cienkiej membrany. Pomiar temperatury jest wykonywany poprzez pomiar zmian napięcia diody krzemowej. Każda struktura scalona zastosowana w układzie scalonym BM680 zawiera czujnik temperatury.

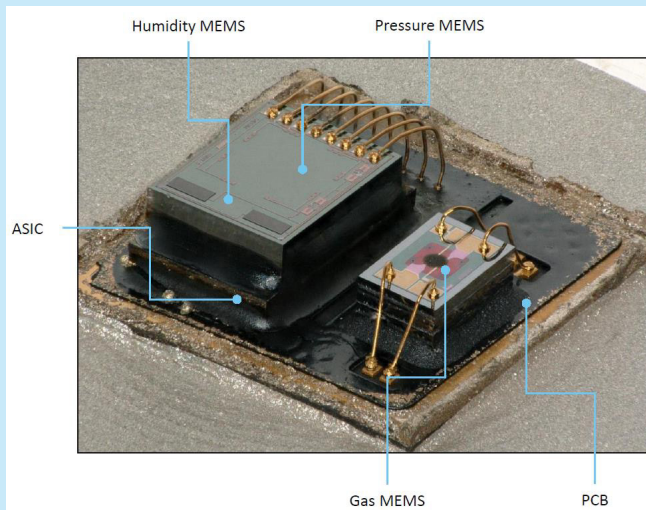
Czujnik gazu układu BME680 jest wytwarzany w technologii MOX. Pozwala to na uzyskanie bardzo dobrej jakości pomiaru, bardzo krótkiego czasu powtarzania pomiaru i bardzo znaczącej redukcji pobieranej mocy. Gazy, które mogą być wykrywane przez BME680, obejmują (niemal wszystkie) lotne związki organiczne (VOC).

Ze względu na podgrzewanie w czujniku MOX powierzchni roboczej następuje wewnątrz obudowy układu wzrost temperatury (nawet o 5°C) oraz spadek wilgotności. Do uzyskania precyzyjnych pomiarów VOC wymagany jest zewnętrzny pomiar temperatury i wilgotności.

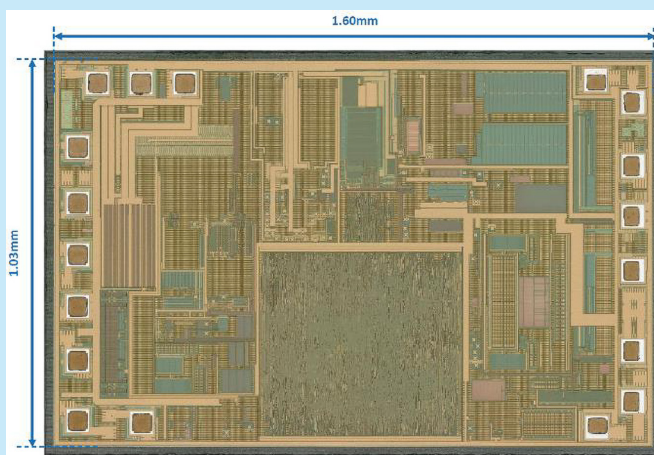
Układ scalony BM680 został zastosowany w nowym module komunikacji mobilnej (LTE) Thingy:91 firmy Nordic Semiconductor [S31].

### Parametry czujnika gazu układu BME680

- Metoda pomiarowa: Półprzewodnikowy scalony czujnik gazu w technologii MOX,
- Tryby pracy: ciągle – C (pomiar co 1 s), niskiej mocy – LP (co 3 s), bardzo niskiej mocy – ULP (co 300 s),
- Wyjście: Rezystancja czujnika do obliczeń IAQ,
- Zakres: IAQ: 0...500 z rozdzielczością 1, dokładność: 3 max.,
- Rozdzielczość pomiaru rezystancji: 0,08 % typ.,
- Odchylenie czujnik-czujnik:  $\pm 15\%$ ,
- Stabilność długoterminowa: typ 1% typ. (test 220 godzin),
- Czas odpowiedzi ( $\tau$  33...63%): 0,75/1,4/92 s (tryb C/LP/ULP) typ.,
- Prąd średni: 0,09/0,9/12 mA (tryb C/LP/ULP) typ.,



Rysunek 5. Widok wnętrza układu BME680 firmy Bosch [10]



Rysunek 6. Widok struktury scalonej ASIC układu BME680 firmy Bosch [10]

- Zasilanie analogowe: 1,7...3,6 V (1,8V typ.),
- Zasilanie układu cyfrowego i interfejsu cyfrowego: 1,2...3,6 V (1,6V typ.),
- Prąd maksymalny grzejnika: 17 mA typ.,
- Czas grzania, ustawiany cyfrowo: 1...4032 ms (typowo 20...30 ms)
- Prąd uśpienia: 0,15  $\mu$ A typ.,
- Interfejs cyfrowy: I<sup>2</sup>C oraz SPI
- Słowo danych: 16b,
- Do wykonywania obliczeń wielu parametrów (jak statyczne IAQ, CO<sub>2</sub>eq i innych) służy darmowa biblioteka firmowa Bosh Software Environmental Cluster (BSEC).

### Konstrukcja układu SIP

Układ BM680 jest zamknięty w metalowej obudowie (LGA8) o rozmiarach 3×3×0,93 mm. Daje to bardzo dobrą odporność na zakłócenia elektromagnetyczne. Widok wnętrza układu BME680 jest pokazany na **rysunku 5** [10]. Układ jest skonstruowany jako SIP (System In Package) z trzema strukturami scalonymi CMOS umieszczonymi na płytce drukowanej (PCB). Układ cyfrowy interfejsu oraz przetwarzania cyfrowego, a także układ analogowo-cyfrowy (wzmacniacze i przetworniki A/C) jest wykonany w postaci dużej struktury układu ASIC (**rysunek 6**). W obudowie, powyżej tej struktury jest umieszczona struktura scalona zawierająca czujnik ciśnienia (rysunek 5, duże pole na środku) oraz czujnik wilgotności i temperatury (lewa krawędź). Osobno została umieszczona struktura scalona czujnika gazu (po prawej). Na rysunku 5 widać doskonale druciki (*bond*) dołączone do pól kontaktowych struktur scalonych.

## Czujnik jakości powietrza CCS811 firmy AMS (CCS)

Układ scalony CCS811 firmy AMS jest przeznaczony do pomiaru jakości powietrza (IAQ) [11]. Ma niewielkie rozmiary 2,7×4,0×1,1 mm (rysunek 7). Wewnętrzny czujnik gazu tego układu jest wytwarzany w technologii MOX z zastosowaniem unikalnego rozwiązania „micro-hotplate”. Pozwala to na uzyskanie bardzo dobrej jakości pomiaru, bardzo krótkiego czasu powtarzania pomiaru i bardzo znaczącej redukcji pobieranej mocy. Pobiera on tylko 1,2 do 46 mW mocy (w zależności od trybu pracy). Układ posiada wbudowany mikrokontroler oraz przetwornik ADC. Układ CCS811 pozwala na wykrywanie w powietrzu bardzo niskiego stężenia dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>) oraz wiele lotnych związków organicznych VOC. Posiada udowodnioną odporność na powszechnie występujące siloksany, co zapewnia długoterminową niezawodność pomiarów (ponad 5 lat).

Układ CCS811 stosuje inteligentny algorytm obliczeniowy (pracujący na wbudowanym mikrokontrolerze) do obróbki surowych danych pomiarowych z czujnika gazu. Istnieje możliwość reprogramowania układu i wpisania nowego kodu firmowego.

Do poprawnej pracy potrzebny jest długi okres nagrzewania (około 20 min.) po włączeniu zasilania. Do wyznaczenia poziomu obecności gazu potrzebne jest wcześniejsze ustalenie rezystancji czujnika MOX w czystym powietrzu (*Clean Air Baseline*) – jest to rezystancja odniesienia. Stabilne wartości pomiaru rezystancji występują po dłuższym czasie. Dodatkowo w ciągu pierwszych 48 godzin od pierwszego włączenia zasilania następują spore zmiany tej rezystancji. W praktyce sytuacja jest jeszcze bardziej skomplikowana. Układ scalony CCS811 nie umożliwia przechowywania parametrów rezystancji bazowej w pamięci nieulotnej. Musi to wykonywać zewnętrzny układ mikroprocesorowy. W trakcie kalibracji odczytuje on stan odpowiednich rejestrów, a następnie po ponownym włączeniu zasilania przywraca ich stan.

Układ CCS811 wykrywa tylko relatywną zmianę stężenia gazu, w odniesieniu do poziomu odniesienia. Na podstawie rezystancji czujnika MOX obliczany jest eCO<sub>2</sub> – równoważny (*equivalent*) poziom dwutlenku węgla oraz eTVOC – równoważny całkowity (*equivalent Total*) poziom lotnych związków organicznych.

Układ CCS811 został zastosowany w zestawie Nordic Thingy:52 firmy Nordic Semiconductor [S21].

### Parametry układu CCS811

- Metoda pomiarowa: Półprzewodnikowy scalony czujnik gazu w technologii MOX,
- Tryby pracy (odstęp czasu pomiędzy pomiarami): uśpienie- I, ciągle – C (1 s), impulsowy – P (10 s), niskiej mocy – LP (10 s), testowy – T (250 ms),
- Wyjście: eTVOC [ppb], eCO<sub>2</sub> [ppm],
- Zakres: eTVOC: 0...32768 ppb, eCO<sub>2</sub>: 400...32768 ppm,
- Napięcie zasilania: 1,8...3,6 V (1,8V typ.),
- Prąd średni: 30 mA (tryb C) typ., maksymalny 54 mA (tryb C i P),
- Interfejs cyfrowy: I<sup>2</sup>C,
- Słowo danych: 16b.

### Moduł ZMOD4410 czujnika jakości powietrza we wnętrzach firmy Renesas (IDT)

Moduł czujnika gazu ZMOD4410 jest przeznaczony do wykrywania poziomu całkowitego lotnych związków organicznych (TVOC) i monitorowania jakości powietrza w pomieszczeniach (IAQ) [12]. Element czujnikowy modułu składa się z elementu grzejnego na strukturze MEMS opartej na krzemie i rezystora z tlenku metalu (MOX). Kondycjoner sygnału kontroluje temperaturę czujnika i mierzy przewodność MOX, która jest funkcją stężenia gazu.

Wyniki pomiarów można odczytać za pomocą interfejsu I<sup>2</sup>C z mikroprocesorem użytkownika, który przetwarza dane w celu ustalenia

stężenia TVOC, oceny IAQ i równoważnego poziomu dwutlenku węgla (eCO<sub>2</sub>).

Algorytm dostarczony przez firmę IDT dla mikroprocesora użytkownika wykorzystuje dane wyjściowe ZMOD4410 do określenia poziomu gazów TVOC. Algorytm posiada automatyczną korektę poziomu odniesienia, zapewniającą modułowi możliwość uczenia się ze swojego środowiska i rozróżniania podwyższonych poziomów TVOC we wszystkich warunkach. Wbudowana pamięć nieulotna (NVM) przechowuje konfigurację i zapewnia miejsce na dowolne dane użytkownika.

W trybie pracy standardowej i niskiej mocy moduł czujnika gazu ZMOD4410 jest w stanie wykryć podwyższone poziomy TVOC, zgodnie ze standardem UBA. W trybie „odor” czujnik uczy się warunków otoczenia, typowo przez 60 min. Następnie wykrywa zmiany poziomu TVOC i gdy zostanie przekroczony próg zmian definiowany przez użytkownika ustawia sygnał przerwania, który może być użyty do sterowania zewnętrznego urządzenia, np. wentylatora.

Moduł ma trzy osobne wyprowadzenia zasilania: struktur scalonych, grzejnika oraz interfejsu cyfrowego. Przy dopuszczalnym dużym zakresie ich wartości daje to bardzo dużą elastyczność użycia.

### Parametry układu ZMOD4410

- Metoda pomiarowa: Półprzewodnikowy scalony czujnik gazu w technologii MOX,
- Tryby pracy: uśpienia SL, standard – S (pomiar ciągły), niskiej mocy – LP (co 6 s), odor – OD (co 10 s),
- Wyjście: TVOC [ppb], eCO<sub>2</sub> [ppm],
- Zakres: TVOC: 0...1 000 000 ppb, eCO<sub>2</sub>: 400...5000 ppm,
- Dokładność: TVOC 15% wartości mierzonej typ., eCO<sub>2</sub> ±25% (w porównaniu do pomiaru techniką NDIR),
- Stabilność długoterminowa: typ ±5% (gwarantowany czas pracy 12 lat),
- Napięcie zasilania: 1,7...3,6 V (1,8 V/3,6 typ.),
- Prąd średni, typ.: 12 mA (1,8 V), 7 mA (3,3 V),
- Prąd uśpienia: 450 nA typ., 500 μA max. (timer aktywny),
- Interfejs cyfrowy: I<sup>2</sup>C,
- Słowo danych: 16b.
- Moduł ZMOD4410 jest zamknięty w metalowej obudowie (LGA12) o rozmiarach 3×3×0,77 mm. Daje to bardzo dobrą odporność na zakłócenia elektromagnetyczne. Widok wnętrza modułu ZMOD4410 jest pokazany na rysunku 8 [12]. Układ jest skonstruowany jako SIP (*System In Package*) z osobnymi strukturami scalonymi CMOS umieszczonymi na płytce drukowanej (PCB).

### Moduł ZMOD4510 czujnika jakości powietrza na zewnątrz firmy Renesas (IDT)

ZMOD4510 jest pierwszym w branży cyfrowym modułem czujnika jakości powietrza zewnętrznego (*Outdoor Air Quality*) i jest skalibrowany do wykrywania ozonu (O<sub>3</sub>) i tlenków azotu (NO<sub>x</sub>). Są one główną przyczyną nieodpowiedniej jakości powietrza. Układy zapewniają niezawodne wykrywanie, które jest zgodne z indeksem jakości powietrza AQI (*Air Quality Index*) Agencji Ochrony Środowiska USA (EPA) w zakresie pomiaru tych gazów [12]. Moduł ZMOD4510 jest umieszczony w takiej samej małej obudowie co ZMOD4410.

### Parametry układu ZMOD4510

- Metoda pomiarowa: Półprzewodnikowy scalony czujnik gazu w technologii MOX,
- Wyjście: Dane czujnika do obliczeń AQI,
- Zakres: AQI: 0...500 z rozdzielczością 1, powtarzalność ±25%,
- Stabilność długoterminowa: typ ±8%,
- Napięcie zasilania: 1,7...3,6 V (1,8 V/3,6 V typ.),
- Prąd średni: 11 mA (1,8 V), 8 mA (3,3 V) typ.,
- Prąd uśpienia: 450 nA typ., 500 μA max. (timer aktywny),

- Interfejs cyfrowy: I<sup>2</sup>C,
- Słowo danych: 16b.

### Moduł ZMOD4450 czujnika jakości powietrza w chłodniach firmy Renesas (IDT)

Zintegrowany moduł cyfrowego czujnika gazu ZMOD4450 przeznaczony jest do zastosowań w pomiarach jakości powietrza chłodniczego RAQ (*Refrigeration Air Quality*). ZMOD4450 umożliwia programowe skonfigurowanie do wykrywania szerokiej gamy gazów: etylenu, siarkowodoru, siarczku dimetylu, trimetyloaminy i innych. Gazy te wytwarzają zapachy, wpływają na smak jedzenia lub powodują przedwczesne psucie się żywności. Wczesne wykrycie tych gazów umożliwia konsumentom identyfikację i odrzucenie zepsutej żywności, zanim wpłynie ona na inne produkty. Moduł ZMOD4450 jest umieszczony w takiej samej małej obudowie co ZMOD4410. Ma również zbliżone parametry elektryczne. Moduł umożliwia producentom dodanie nowych funkcji wykrywania i łagodzenia zapachu do inteligentnych lodówek (chłodzi).

### Moduł czujnika jakości powietrza MiCS-VZ-89TE firmy Amphenol (SGX)

Zintegrowany moduł czujnika Telaire MiCS-VZ-89TE łączy najnowocześniejszą technologię czujników MOS z inteligentnymi algorytmami wykrywania do monitorowania wartości TVOC i zmian równoważnego poziomu dwutlenku węgla CO<sub>2</sub>eq w ograniczonych przestrzeniach [13].

#### Parametry modułu MiCS-VZ-89TE

- Metoda pomiarowa: Półprzewodnikowy scalony czujnik gazu w technologii MOX,
- Zakres: TVOC 0...1000 ppb (ekwiwalentu izobutyleny), CO<sub>2</sub>eq 400...2000 ppm,
- Napięcie zasilania: 3,3 V ±5%,
- Moc: 125 mW,
- Czas wygrzewania: 15 min.,
- Interfejs cyfrowy: I<sup>2</sup>C, PWM,
- Słowo danych: 16b.
- MiCS-VZ-86/89 jest zbudowany w postaci zintegrowanej płytki drukowanej z wysoką odpornością na wstrząsy i wibracje (rysunek 9). Unikalną cechą modułu jest wyprowadzenie danych w postaci przebiegu PWM.

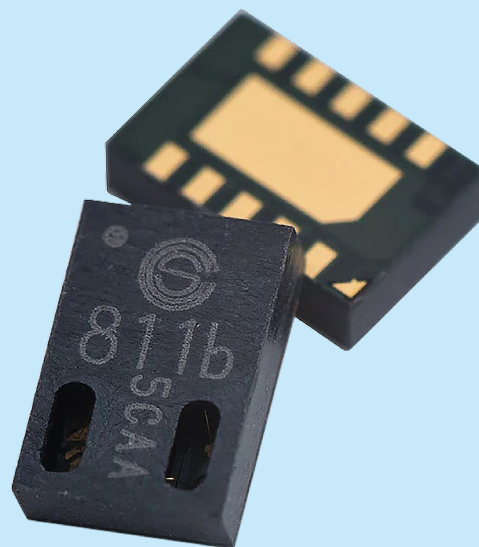
### Czujniki dwutlenku węgla w technologii NDIR

Przyrządy z zastosowaniem techniki niedyfrakcyjnej podczerwieni NDIR (*Non Disperse Infra Red*) wykorzystują spektroskopię absorpcyjną w podczerwieni w celu ustalenia składu i stężenia poszczególnych składników w badanym gazie. Wiązka światła podczerwonego przechodzi przez komorę próbkowania. Cząsteczki CO<sub>2</sub> pochłaniają część światła. Po przejściu przez filtr wąskopasmowy o długości fali 4,2 μm czujnik podczerwieni monitoruje intensywność przychodzącego światła podczerwonego. Mierząc stopień pochłaniania światła podczerwonego, można określić stężenie CO<sub>2</sub>. Zaletą czujników NDIR jest duża czułość i dokładność pomiaru stężenia dwutlenku węgla. Wadą jest dosyć duży rozmiar i spora cena.

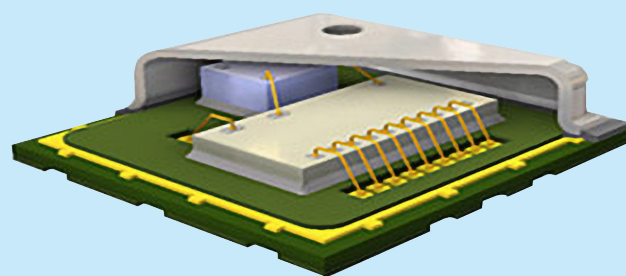
NDIR jest obecnie najpopularniejszą technologią czujników dwutlenku węgla. Ale ma również wady, na przykład jeśli powstanie jakiegokolwiek przesunięcie między źródłem światła a detektorem, sygnał nie będzie w stanie trafić w detektor.

### Moduł SCD30 czujnika CO<sub>2</sub> firmy Sensirion

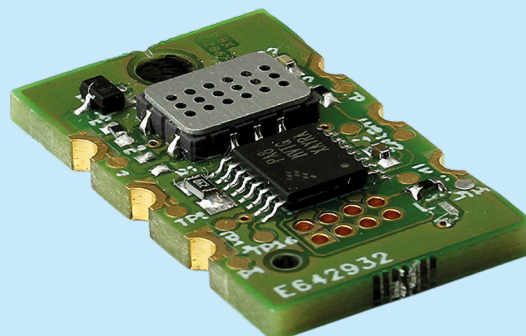
Moduł SCD30 firmy Sensirion to wysokiej jakości czujnik CO<sub>2</sub> z zastosowaniem pomiaru metodą niedyfrakcyjnej podczerwieni (NDIR) [14]. Firma Sensirion opracowała termopila (*thermopile*) w oparciu o technologię CMOSens. Technologia ta umożliwia integrację funkcji



Rysunek 7. Widok układu CCS811 firmy AMS [11]



Rysunek 8. Budowa modułu ZMOD4410 firmy Renesas (IDT) [12]



Rysunek 9. Moduł MiCS-VZ-89TE firmy Amphenol (SGX) [13]

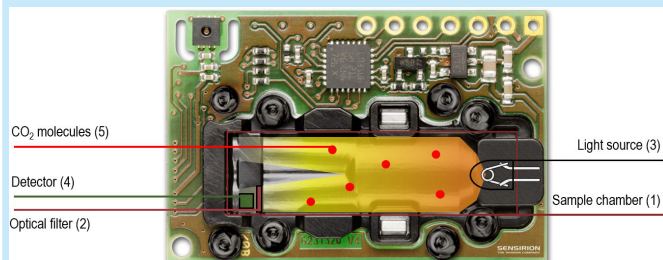
cyfrowych i analogowych CMOS z bardzo cienką membraną wykonaną w warstwie metalowej. Technologia czujnika gazu CO<sub>2</sub> obejmuje nie tylko struktury w krzemie. Obudowa i filtry podczerwieni są również bardzo ważne dla dokładności pomiaru. Dzięki dwukanałowemu pomiarowi stężenia dwutlenku węgla (wbudowany kanał referencyjny) czujnik automatycznie kompensuje zmiany długoterminowe. Mikrokontroler o bardzo niskiej mocy firmy STMicroelectronics steruje modulem i komunikacją.

Aby poprawić dokładność, SCD30 ma wbudowane najlepsze w swojej klasie czujniki temperatury i wilgotności SHT31. Dodatkową dokładność można uzyskać przy uwzględnieniu odczytów ciśnienia otoczenia przez zewnętrzny czujnik.

Czujnik jest dostarczany w pełni skalibrowany i zlinearyzowany. SCD30 oferuje też procedurę automatycznej autokalibracji. Firma Sensirion zaleca 7 dni ciągłych odczytów z wstawieniem co najmniej na 1 godzinę dziennie na „świeże powietrze” w celu ukończenia autokalibracji.

#### Parametry modułu SCD30

- Metoda pomiarowa: Pomiar CO<sub>2</sub> metodą niedyfrakcyjnej podczerwieni (NDIR),



Rysunek 10. Moduł SCD30 firmy Sensirion [14]

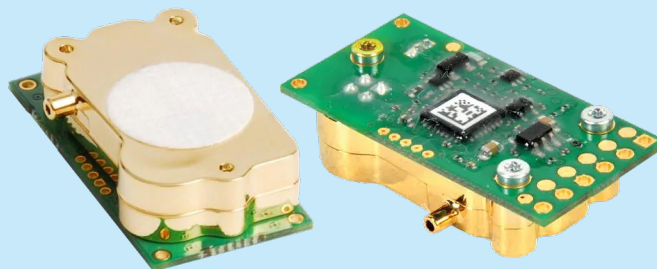
- Zakres: 0...40 000 ppm,
- Dokładność:  $\pm 30$  ppm,
- Powtarzalność:  $\pm 10$  ppm,
- Czas odpowiedzi (t63): 20 s,
- Stabilność temperaturowa: 2,5 ppm/°C (0...50°C),
- Stabilność długoterminowa:  $\pm 50$  ppm,
- Kompensacja poziomu odniesienia: Wewnętrzny kanał referencyjny,
- Napięcie zasilania: 3,3...5,5 V,
- Prąd średni: 19 mA typ. (pomiar co 2 s),
- Prąd w trakcie pomiaru: 75 mA max.,
- Interfejs cyfrowy: UART lub I<sup>2</sup>C, PWM,
- Słowo danych: 16b plus CRC.
- Moduł SCD30 jest zbudowany w postaci zintegrowanej płytki drukowanej o wymiarach zewnętrznych 7×23×35 mm i masie 4 g (rysunek 10). Bardzo mała wysokość modułu umożliwia łatwą integrację z różnymi aplikacjami. Na rysunku 10 widać rozmieszczenie źródła laserowego, komory pomiarowej, filtra optycznego oraz detektorów podczerwieni.

### Moduł T6713 czujnika CO<sub>2</sub> firmy Amphenol (SGX)

Moduł Telaire T6713 jest przeznaczony do zastosowań, w których poziomy CO<sub>2</sub> muszą być mierzone i kontrolowane w pomieszczeniach [15]. Moduł pracuje metodą NDIR z połączoną optyką i zastosowaniem opatentowanego przez Telaire algorytmu ABC (*Logic Self Calibrated*). Wszystkie moduły są fabrycznie skalibrowane.

### Parametry modułu T6713

- Metoda pomiarowa: Pomiar CO<sub>2</sub> metodą niedyspersyjnej podczerwieni (NDIR),



Rysunek 11. Moduł T6713 firmy Amphenol (SGX) [15]

- Zakres: 0...5000 ppm,
- Dokładność:  $\pm 30$  ppm,
- Czas odpowiedzi (90%): <3 minuty,
- Stabilność temperaturowa: 5 ppm/°C,
- Zależność od ciśnienia: 0,13% odczytu na mm Hg,
- Stabilność długoterminowa: <2% pełnego zakresu, cały okres eksploatacji (typowo 15 lat),
- Kompensacja poziomu odniesienia: Wewnętrzny kanał referencyjny,
- Czas wygrzewania: 2 min. (początek działania), 10 min. (pełna dokładność),
- Maksymalna częstotliwość pomiarów: co 5 s,
- Napięcie zasilania: 4,5...5,5 V,
- Prąd średni: 20 mA typ.,
- Prąd w trakcie pomiaru: 155 mA typ. (200 mA max.),
- Interfejs cyfrowy: UART lub I<sup>2</sup>C, PWM.
- Moduł T6713 jest zbudowany w postaci zintegrowanej płytki drukowanej o wymiarach zewnętrznych 30×15,6×8,6 mm (rysunek 11).

### Technologia PASens firmy Sensirion

Technologia PASens firmy Sensirion oparta jest na zasadzie wykrywania fotoakustycznego [16]. Pozwala na ekstremalną miniaturyzację czujnika CO<sub>2</sub> bez uszczerbku dla jego działania. Wynika to z faktu, że czułość czujnika jest niezależna od wielkości wnęki optycznej. Ponadto liczba komponentów jest drastycznie zmniejszona.

Efekt fotoakustyczny został odkryty już w 1880 r. ale nie miał zastosowania do konstrukcji tanich czujników z powodu brakuających komponentów technologicznych. Z drugiej strony, drogie

### Wybrane pozostałe artykuły kursu „Systemy dla Internetu Rzeczy”

[S21] Zestaw Nordic Thingy:52 IoT Sensor Kit, EP12/2018

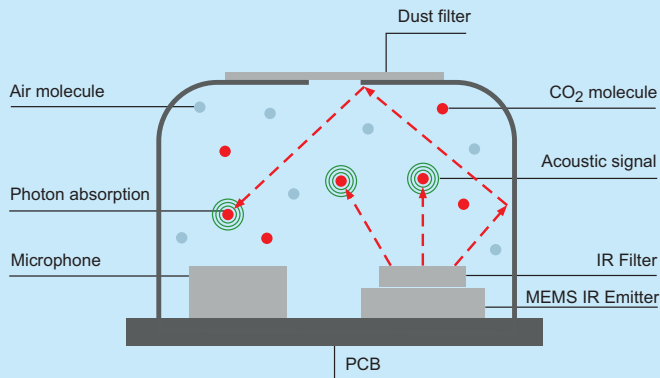
[S31] Nordic Thingy:91 – platforma prototypowania dla mobilnego IoT, EP11/2019

[S32] Scalone czujniki cyfrowe wilgotności i temperatury, EP 12/2019

### Literatura

- [1] How to Implement Gas Sensors for Indoor Air-Quality Applications, Debra Deininger, JAN 08, 2019, <http://bit.ly/39KxWJ5>
- [2] Estimating CO<sub>2</sub>, ZMOD4410 Application Note, AN-1005, May 24, 2018, Renesas (IDT), <http://bit.ly/328ZMMQ>
- [3] Overview of TVOC and Indoor Air Quality, Christian Meyer, Renesas (Integrated Device Technology), May 24, 2018, <http://bit.ly/3b15Ccg>
- [4] CMOSens Technology in Gas Sensing, Sensirion, <http://bit.ly/31YcwwW>
- [5] Breakthrough in CO<sub>2</sub> Sensing: First Sensirion Miniaturized CO<sub>2</sub> Sensor, | Press Release, 05.07.2019, Sensirion, <http://bit.ly/2SzSxuc>
- [6] Multi-Pixel Gas Sensors SGP, Sensirion, <http://bit.ly/39MjlaZ>
- [7] SGP30 Gas Sensor from Sensirion, System Plus Consulting, <http://bit.ly/2viChOA>
- [8] Multi-Gas, Humidity and Temperature Module SVM30, Sensirion, <http://bit.ly/3244HON/>

- [9] BME680 Low power gas, pressure, temperature & humidity sensor, Bosch Sensortec, <http://bit.ly/2P0cyry>
- [10] Bosch Sensortec's BME680, a 4-in-1 integrated environmental sensor, December 12, 2019, Bosch, <http://bit.ly/2Hudsbd>
- [11] CCS811 Gas Sensor Solution, AMS AG, <http://bit.ly/2APcF1b>
- [12] Gas Sensors – TVOC, VOC, Hydrogen, Flammable, Renesas (IDT), <http://bit.ly/2P0vHJX>
- [13] Telaire MiCS-VZ-89TE | Integrated VOC Sensor Module, Amphenol Advanced Sensors (SGX), <http://bit.ly/2UX5649>
- [14] SCD30 – Sensor Module for HVAC and Indoor Air Quality Applications, Sensirion, <http://bit.ly/37wrDaz>
- [15] Telaire T6713, CO<sub>2</sub> Sensor Module, Amphenol Advanced Sensors (SGX), <http://bit.ly/2P10HbO>
- [16] PASens Technology, Sensirion, <http://bit.ly/3bHLTJL>



**Rysunek 12. Zasada działania technologii PASens firmy Sensirion [16]**

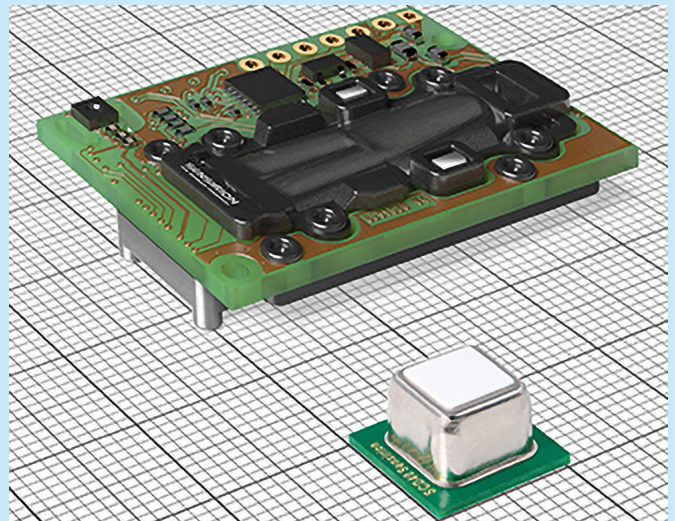
instrumenty laboratoryjne z zastosowaniem efektu fotoakustycznego mają ugruntowaną pozycję dzięki doskonałej wydajności.

Dzięki głębokiej wiedzy firmy Sensirion w dziedzinie miniaturyzacji czujników (technologia CMOSens) udało się opracować technologię PASens. Stanowi to przełom w miniaturyzacji układów z wykorzystaniem wykrywania fotoakustycznego. Krytyczne komponenty zostały umieszczone wewnętrznie, aby zapewnić najwyższą wydajność przy zachowaniu opłacalności.

Wiązka światła w pasmie absorpcji cząsteczek CO<sub>2</sub> (o długości 4,2 μm) jest emitowana do zamkniętej komory pomiarowej (rysunek 12). Cząsteczki CO<sub>2</sub> w komorze pomiarowej absorbują część wypromieniowanego światła, podczas gdy inne cząsteczki nie oddziałują ze światłem o tym spektrum. Energia pochłonięta przez cząsteczkę CO<sub>2</sub> wzbudza głównie ich wibracje, co w zamkniętej komorze pomiarowej powoduje wzrost ciśnienia. Modułacja zmian ciśnienia w komorze pomiarowej można zmierzyć za pomocą mikrofonu. Sygnał z mikrofonu służy zatem jako miara poziomu cząsteczek CO<sub>2</sub> obecnych w komorze pomiarowej i może być używany do wyznaczania koncentracji CO<sub>2</sub>.

### Moduł SCD40 czujnika CO<sub>2</sub> firmy Sensirion

W połowie roku 2019 firma Sensirion pokazała moduł SCD40 – pierwszy zminiaturyzowany czujnik CO<sub>2</sub> [5]. Rozmiar czujnika SCD40 wynosi 10×10×7 mm, czyli 5 razy mniej niż w przypadku modułu poprzedniej generacji SCD30 (rysunek 13). Ta przełomowa innowacja oparta jest na zasadzie wykrywania fotoakustycznego i łączy minimalny rozmiar z maksymalną wydajnością, otwierając



**Rysunek 13. Porównanie rozmiaru układów SCD30 (po lewej) oraz SCD40 (po prawej) [5]**

wiele nowych możliwości integracji i zastosowań. Dodatkowo czujnik SCD40 wykorzystuje najlepsze w swojej klasie czujniki wilgotności i temperatury. SCD40 nadaje się szczególnie do zastosowań takich jak: Internet Rzeczy, motoryzacja, klimatyzacja, urządzenia i urządzenia konsumpcyjne. SCD40 ma zostać wprowadzony na rynek w połowie roku 2020.

### Podsumowanie

Powyższy opis jest tylko wprowadzeniem do dziedziny pomiarów gazów. Zostały przedstawione wiodące technologie pomiarów oraz reprezentatywne układy scalone różnych producentów z interfejsem cyfrowym. Jednak rynek producentów jest bardzo duży. Działa na nim wiele firm, szczególnie dalekowschodnich. Obecnie rynek czujników gazu jest napędzany głównie przez układy oczyszczania powietrza, ogrzewanie, wentylację i klimatyzację. Obniżenie ceny, wydłużenie czasu poprawnej pracy oraz zwiększenie łatwości użycia czujników gazu spowoduje znaczący wzrost ich użycia w aplikacjach konsumenckich.

Pomiar poziomu pyłów staje się ostatnio bardziej istotnym zagadnieniem zdrowotnym. Jest to osobne zagadnienie i zostanie omówione w przyszłości.

**Henryk A. Kowalski**  
Instytut Informatyki  
Politechnika Warszawska

Miesięcznik „Elektronika Praktyczna” (12 numerów w roku) jest wydawany przez AVT-Korporacja Sp. z o.o. we współpracy z wieloma redakcjami zagranicznymi.

#### Wydawca:

AVT-Korporacja Sp. z o.o.  
03-197 Warszawa, ul. Leszczyńska 11  
tel.: 22 257 84 99, faks: 22 257 84 00

#### Adres redakcji:

03-197 Warszawa, ul. Leszczyńska 11  
tel.: 22 257 84 60  
faks: 22 257 84 00  
e-mail: redakcja@ep.com.pl  
[www.ep.com.pl](http://www.ep.com.pl)

#### Redaktor Naczelny:

Wiesław Marcinia

#### Redaktor Programowy, Przewodniczący Rady Programowej:

Piotr Zbysiński

#### Zastępca Redaktora Naczelnego, Redaktor Prowadzący:

Damian Sosnowski

#### Zastępca Redaktora Naczelnego, Menedżer Magazynu

Marcin Karbowniczek

#### Szef Pracowni Konstrukcyjnej:

Grzegorz Becker, tel.: 22 257 84 58

#### PARK Pracownia Badań Rynku Konstruktorów:

Maksymilian Hoser, tel.: 22 257 84 65

#### Redaktor strony internetowej [www.ep.com.pl](http://www.ep.com.pl)

Dariusz Welik

#### Zespół marketingu i reklamy:

Katarzyna Gugata, tel.: 22 257 84 64  
Adam Kęska, tel.: 22 257 84 63  
Bożena Krzykawska, tel.: 22 257 84 42  
Grzegorz Krzykowski, tel.: 22 257 84 60  
Maksymilian Hoser, tel.: 22 257 84 65

#### Sekretarz Redakcji:

Grzegorz Krzykowski, tel.: 22 257 84 60

#### DTP i okładka:

MAD Sp. z o.o.

#### Stali Współpracownicy:

Jacek Bogusz, Lucjan Bryndza, Jarosław Doliński,  
Andrzej Gawryluk, Krzysztof Górski, Tomasz Jabłoński,  
Michał Kurzela, Szymon Panecki, Sławomir Skrzyński,  
Ryszard Szymański, Adam Tatus, Robert Wołgajew

#### Uwaga!

Kontakt z wymienionymi osobami jest możliwy via e-mail, według schematu: imię.nazwisko@ep.com.pl

#### Prenumerata w Wydawnictwie AVT

[www.avt.pl/prenumerata](http://www.avt.pl/prenumerata)  
lub tel.: 22 257 84 22  
e-mail: prenumerata@avt.pl  
[www.sklep.avt.pl](http://www.sklep.avt.pl), tel.: 22 257 84 66

#### Prenumerata w RUCH S.A.

[www.prenumerata.ruch.com.pl](http://www.prenumerata.ruch.com.pl)  
lub tel.: 801 800 803, 22 717 59 59  
e-mail: prenumerata@ruch.com.pl



Wydawnictwo  
AVT-Korporacja Sp. z o.o.  
należy do Izby Wydawców Prasy

Copyright AVT-Korporacja Sp. z o.o.  
03-197 Warszawa, ul. Leszczyńska 11

Projekty publikowane w „Elektronice Praktycznej” mogą być wykorzystywane wyłącznie do własnych potrzeb. Korzystanie z tych projektów do innych celów, zwłaszcza do działalności zarobkowej, wymaga zgody redakcji „Elektroniki Praktycznej”. Przedruk oraz umieszczenie na stronach internetowych całości lub fragmentów publikacji zamieszczonych w „Elektronice Praktycznej” jest dozwolone wyłącznie po uzyskaniu zgody redakcji. Redakcja nie odpowiada za treść reklam i ogłoszeń zamieszczonych w „Elektronice Praktycznej”.

