

Systemy dla Internetu Rzeczy (27)



Wgląd w układy SoC (System on Chip), moduły SiP (System in Package) oraz elastyczne układy SoP (Silicon-on-Polymer)

Dla Internetu Rzeczy najbardziej popularne są układy SoC (System on Chip). Integrują one w postaci pojedynczej struktury scalonej mikrokontroler, układ radiowy, układ zasilania z jego zarządzaniem, pamięci oraz układy peryferyjne analogowe i cyfrowe. Wielu dostawców oferuje bardzo podobne układy SoC. Obecny kierunek rozwoju, widoczny na tegorocznych targach Embedded World 2019, to zastosowanie modułów SiP (System in Package). Koszt modułu jest trochę wyższy niż realizacja bezpośrednio na płycie drukowanej. Za to umożliwia obniżenie kosztu całego systemu oraz znaczące zwiększenie jego możliwości. Jednak najnowsza rewolucyjna technologia to elastyczne układy SoP (Silicon-on-Polymer). Właśnie w kwietniu został pokazany pierwszy elastyczny procesor komunikacyjny dla IoT o grubości o połowę mniejszej niż ludzki włos.

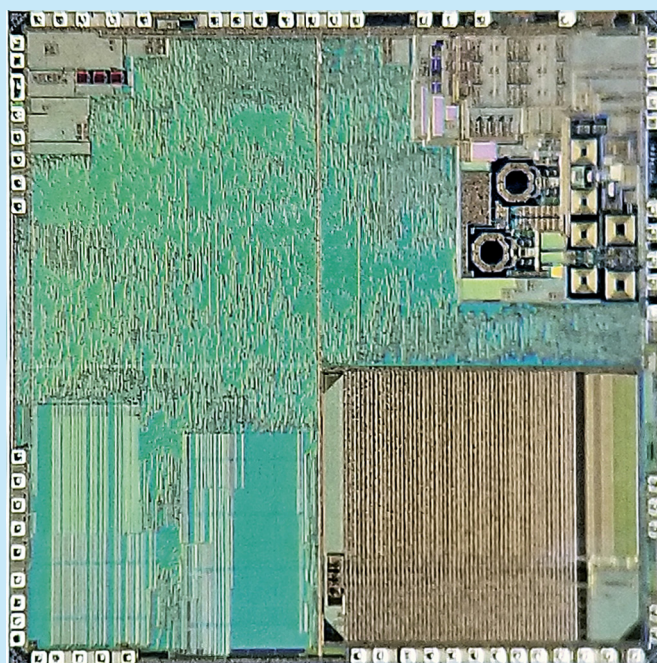
Węzły końcowe sieci komunikacyjnych IoT są najczęściej realizowane z wykorzystaniem układów SoC. W bardziej rozbudowanych rozwiązaniach, np. do obsługi komunikacji mobilnej (LTE), stosowane są moduły SiP. Wyższe wymagania występują przy realizacji bramek dostępowych sieci. Tutaj również znajdują zastosowanie moduły SiP.

Nieczęsto firmy pokazują organizację wewnętrzną swoich układów i modułów. Firma TechInsights publikuje raporty analizy technologii, używając inżynierii odwrotnej (Reverse Engineering) do analizy struktur układów scalonych. Stworzona biblioteka raportów jest największą na świecie bazą analiz inżynierii odwrotnej produktów półprzewodnikowych i konsumenckich, również dla rynku IoT [2].

Układy SoC

SoC (System on Chip) – mianem tym określa się pojedynczy układ scalony zrealizowany na jednej strukturze półprzewodnikowej, zawierający kompletny system elektroniczny, w tym układy cyfrowe i cyfrowo-analogowe, pamięci, układy analogowe oraz układy radiowe. Typowym obszarem zastosowań układów SoC są systemy wbudowane oraz Internet Rzeczy. Najbardziej rozpowszechnione są układy SoC z użyciem rdzeni procesorowych w architekturze ARM.

Układ SX1272 firmy Semtech Układ SX1272 firmy Semtech jest nadajnikiem – odbiornikiem radiowym LPWAN (dalekiego zasięgu) na pasmo 860...1000 MHz z wykorzystaniem technologii LoRa (oraz



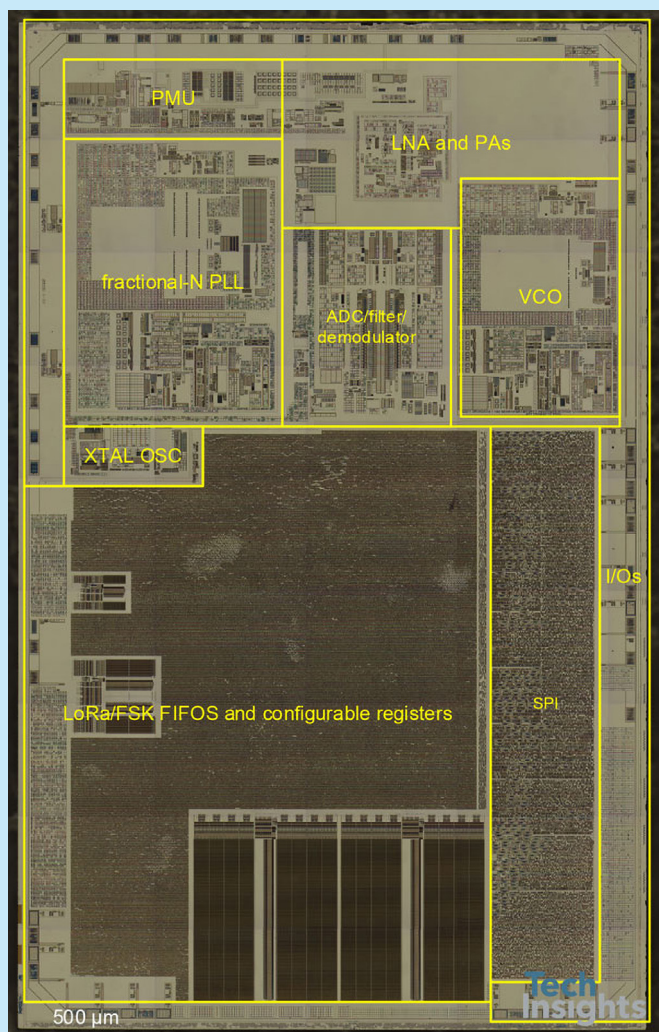
modulacje FSK, GFSK, MSK, GMSK i OOK). Układ cechuje się bardzo dobrymi parametrami transmisji: czułość do -137 dBm, nadajnik do $+14$ dBm, pobór mocy odbiornika do 10 mA, podtrzymanie zawartości rejestrów do 100 nA.

Układ SX1272 jest tylko nadajnikiem – odbiornikiem radiowym i wymaga odpowiedniego procesora spełniającego zalecane wymagania: RAM $8/16$ KB, Flash $128/256$ KB, AES 128 b, $4 \times$ GPIO, SPI (SCK, MOSI, MISO, NSS), RTC ($32,768$ kHz XTAL), IEEE 64-bit Extended Unique Identifier EUI-64 (OUI: 24 lub 30 b, SN: 40 lub 34 b).

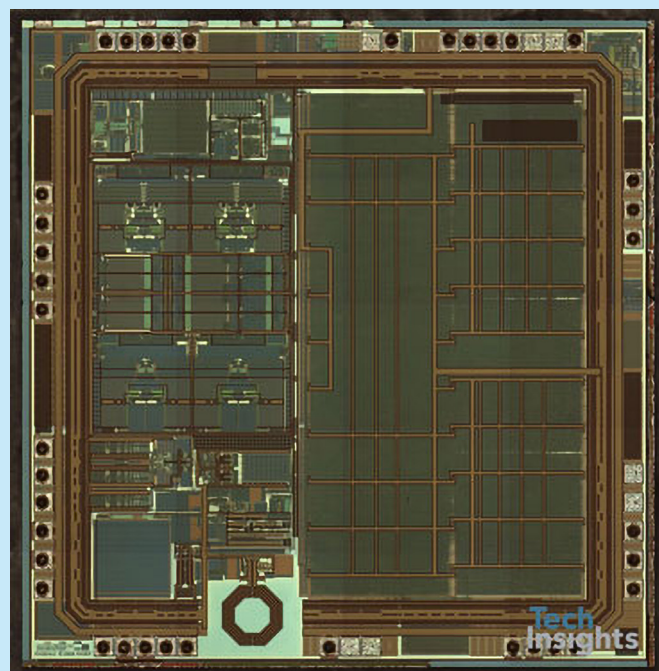
Firma TechInsights przeanalizowała układ SX1272 [2] w obudowie QFN 28 o rozmiarze $6,0$ mm (L) \times $6,0$ mm (W) \times $0,93$ mm (T). Rozmiar pojedynczej struktury scalonej wynosi $4,04$ mm \times $2,50$ mm ($10,10$ mm²). TechInsights opisała kluczowe bloki funkcjonalne układu SX1272 (rysunek 1): syntezer częstotliwości z rozdzielczością 61 Hz, interfejs SPI z blokiem rejestrów, wzmacniacz niskoszumny i wzmacniacz mocy oraz układ zasilania. Zwraca uwagę duża powierzchnia zajmowana przez układy cyfrowe.

Układ AX-SFJK-API firmy ON Semiconductor Układy serii AX-SFxx oraz AX-SFxx-API firmy ON Semiconductor są układami realizującymi dwukierunkową transmisję węzła sieci Sigfox. Do komunikacji z użytkownikiem zostało zastosowane łącze standardu RS232 UART. Układy serii AX-SFxx stosują komunikację z poleceniami standardu AT. Układy serii AX-SFxx-API stosują komunikację

z zastosowaniem specjalnej biblioteki firmowej. Warianty układów mają certyfikację do pracy w sieci Sigfox dla różnych regionów (oznaczenie xx): EU: RC1 Europa, US: RC2 USA, Mexico, Brazil, JK: RC3



Rysunek 1. Funkcjonalne bloki układu SX1272 firmy Semtech [2]



Rysunek 2. Warstwa polikrzemowa układu AX-SFJK-API firmy ON-Semiconductor [2]

Japan, AZ: RC4 Latin America. Do realizacji węzła sieci potrzebna jest płytka drukowana o minimalnych rozmiarach 20×13 mm.

Firma TechInsights przeanalizowała układ nadawczo-odbiorczy AX-SFJK-API w obudowie QFN 40 o rozmiarach 7,0 mm (L) × 5,0 mm (W) × 0,90 mm (T) [2]. Układ nadajnika-odbiornika i procesor został zintegrowany w jednej strukturze scalonej (rysunek 2). Rozmiar struktury wynosi 2,27 mm×2,33 mm (5,29 mm²).

Układ Hi2110 (Boudica 120) firmy HiSilicon Z odzyskaniem informacji o układach dostarczanych przez Huawei jest problem. Są tylko ograniczone informacje o układach Boudica firmy HiSilicon (część Huawei): Boudica 120/Hi2110, Boudica 150/Hi2150. Układ scalony Hi2110 typu SoC obsługuje standard komunikacyjny z obsługą NB-IoT LTE Cat NB1. Integruje on układ radiowy pracujący w zakresie 690...960 MHz oraz kilka procesorów. Trzy rdzenie ARM Cortex-M3 są przeznaczone dla obsługi protokołu, bezpieczeństwa i aplikacji użytkownika. Jest też procesor DSP obsługujący modem. Układ zawiera zintegrowany moduł PMU udostępniający stan bardzo głębokiego uśpienia dla długiej pracy z zasilaniem baterijnym [6].

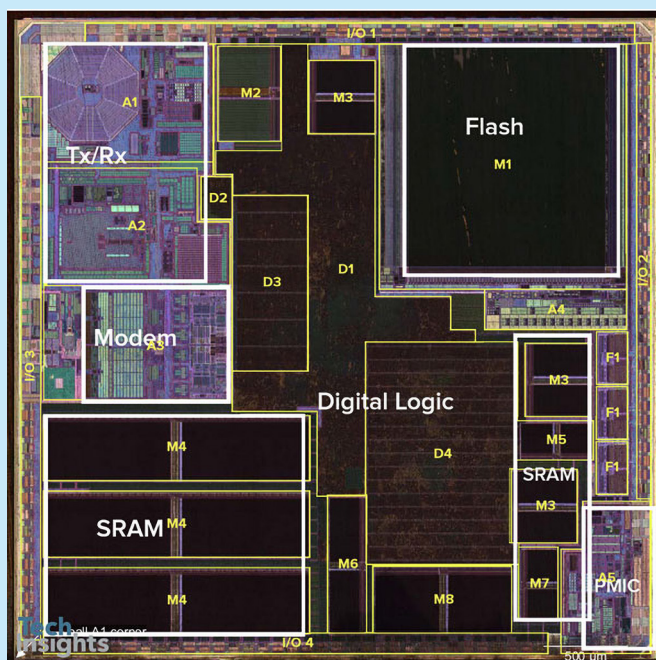
Firma TechInsights przeanalizowała układ Hi2110 (Boudica 120) w obudowie BGA81 o rozmiarach 5,3 mm (L) × 5,3 mm (S) × 1,0 mm (T) [2]. Rozmiar struktury wynosi 3,83 mm × 3,83 mm (14,67 mm²). TechInsights opisała kluczowe bloki funkcjonalne układu: moduły cyfrowe, analogowe, pamięci, wejście/wyjście oraz zasilanie (rysunek 3).

Układ Monarch SQN3330 firmy Sequans Układy firmy Sequans są przeznaczone głównie dla producentów urządzeń. Układ scalony Monarch SQN3330 firmy Sequans obsługuje standard LTE-M oraz NB-IoT. Integruje on układ nadawczo-odbiorczy, modem, pamięć i zarządzanie zasilaniem w jednym układzie typu SoC [9]. Układ wykonany w technologii CMOS 40 nm obsługuje pasmo 699 MHz do 2,7 GHz.

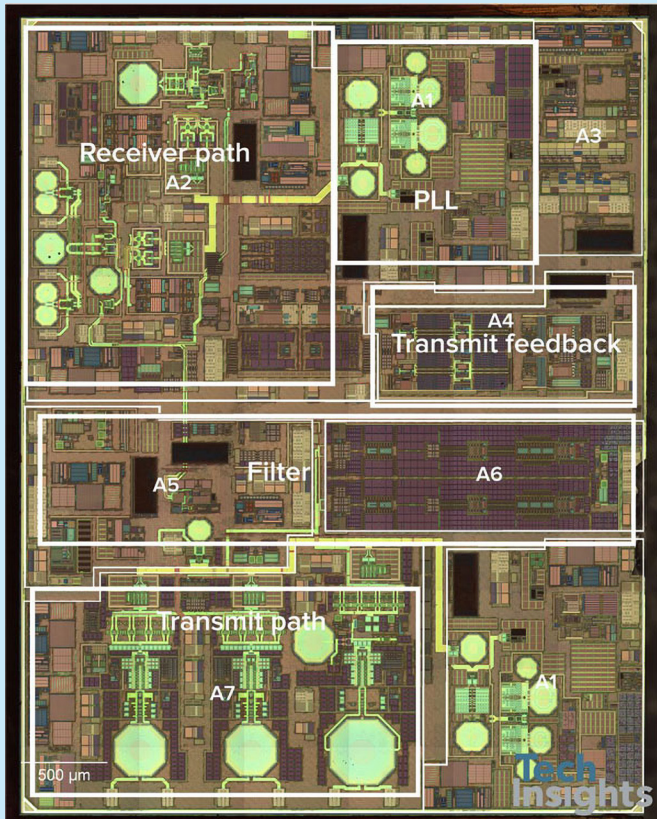
Firma TechInsights przeanalizowała układ Monarch SQN3330 w obudowie FC-CSP o wymiarach 8,5 mm (L) × 6,5 mm (S) × 0,55 mm (T). Rozmiar struktury wynosi 3,67 mm × 4,64 mm (17,03 mm²). Uważa się, że lewy dolny róg matrycy (rysunek 4) zawiera część transmisyjną ścieżki danych, podczas gdy lewy górny róg matrycy jest częścią odbiorczą ścieżki danych [2].

Moduły SiP

Moduły SiP to funkcjonalne systemy lub podsystemy umieszczone w standardowej obudowie, takiej jak LGA, FBGA, QFN lub FO-WLP.



Rysunek 3. Bloki funkcjonalne układu Hi2110 firmy HiSilicon [2]



Rysunek 4. Bloki funkcjonalne układu SQN3330 firmy Monarch Sequans zidentyfikowane na warstwie polikrzemowej [2]

Zawierają dwie lub więcej różnych struktur scalonych, zazwyczaj łączonych z innymi komponentami, takimi jak układy pasywne, filtry, MEMS, czujniki i/lub anteny. Komponenty są montowane razem na podłożu, aby stworzyć zindywidualizowany, wysoce zintegrowany produkt. Moduły SiP mogą wykorzystywać kombinację różnych zaawansowanych metod montażu [1].

Istnieją podstawowe wymagania, które moduł SiP powinien spełniać:

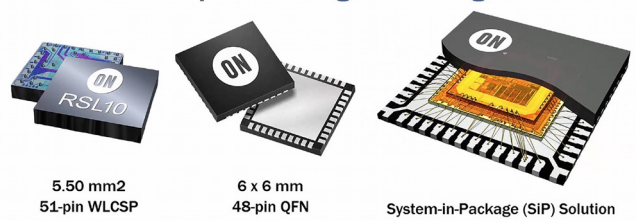
- Integracja różnych aktywnych elementów półprzewodnikowych i elementów pasywnych w jednym systemie, w którym aktywnymi komponentami mogą być mikroprocesory, pamięci, wyspecjalizowane urządzenia przetwarzające, obwody analogowe, zarządzanie energią i czujniki.
- Miniaturyzacja wynikająca z tego implementacji.
- Skalowalność umożliwiającą korzystanie z niewielkiego rozmiaru produkcji.

W tym miejscu koncepcja „tego, co jest dobre w świecie półprzewodników” uzupełnia koncepcję „tego, co jest dobre w świecie systemów”. Technologia SiP może rozwiązać wiele problemów związanych z projektowaniem i produkcją, umożliwiając szybszy i łatwiejszy rozwój elektroniki.

Moduł AX-SIP-SFEU firmy ON Semiconductor Moduły SiP firmy ON Semiconductor o oznaczeniach AX-SIP-SFEU oraz AX-SIP-SFEU-API zawierają układ AX-SHEU typu SoC [7]. Integrują one wszystkie elementy kompletnego węzła sieci Sigfox z certyfikacją na rejon RC1 Europa. Do pracy wystarczy dołączyć antenę i zasilanie. Moduł jest zamykany w ekranowanej obudowie SIP38 o rozmiarach 9×7×1 mm. Oznacza to dziesięciokrotne zmniejszenie wymaganej powierzchni.

Moduł Monarch SQN66430 SiP firmy Sequans Moduł Monarch SQN66430 SiP firmy Sequans integruje układ scalony SQN3330 z modułem radiowym LTE SKY66430 firmy Skyworks [9]. Powstał najmniejszy i najcieńszy (8,8×10,8×0,95 mm) oraz najbardziej zintegrowany moduł do realizacji mobilnego Internetu Rzeczy.

Multiple Package Offerings



Rysunek 5. Moduł RSL10 SiP firmy ON Semiconductor [7]

Moduł RSL10 SiP firmy ON Semiconductor Układ scalony (typu SoC) RSL10 firmy ON Semiconductor zawiera główny rdzeń ARM Cortex-M3 oraz dodatkowo rdzeń LPDSP32[5]. Jest to rdzeń DSP przeznaczony do wykonywania złożonych obliczeń w czasie rzeczywistym. Umożliwia on realizowanie aplikacji o dużych wymaganiach obliczeniowych jak kodek audio. Układ cechuje się bardzo niskim poborem mocy w stanie uśpienia (62,5 nW) oraz pracy odbiornika (7 mW).

Z zastosowaniem układu RSL10 firma ON Semiconductor opracowała moduł RSL10 SiP (**rysunek 5**). Integruje on układ radiowy, antenę oraz elementy pasywne w obudowie SIP51 o rozmiarach 6×8×1,46 mm [7]. Moduł ma certyfikację Bluetooth 5 oraz certyfikację pracy w wielu krajach. Znacząco redukuje to czas i koszt wdrożenia urządzenia do produkcji.

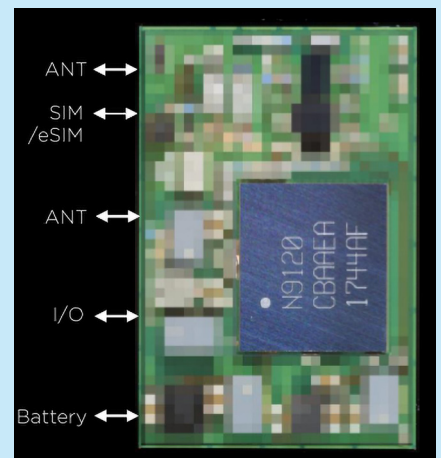
Moduł znalazł zastosowanie w systemach IoT stosujących zasilanie z odzyskiwaniem energii (energy harvesting), takich jak energia słoneczna oraz mechaniczna (np. przyciski).

Moduł nRF9160 SiP firmy Nordic Semiconductor Firma Nordic Semiconductor opracowała własny układ scalony (SoC) do obsługi komunikacji mobilnej (LTE) IoT w standardach LTE-M oraz NB-IoT. Jednak jest on oferowany tylko w postaci modułu SiP (**rysunek 6**). Firma Nordic Semiconductor współpracowała przy opracowaniu modułu z firmą Qorvo, co pozwoliło jej zastosować zaawansowany interfejs radiowy oraz zaawansowaną technologię MicroShield do uzyskania bardzo wysokiego stopnia zintegrowania [S22].

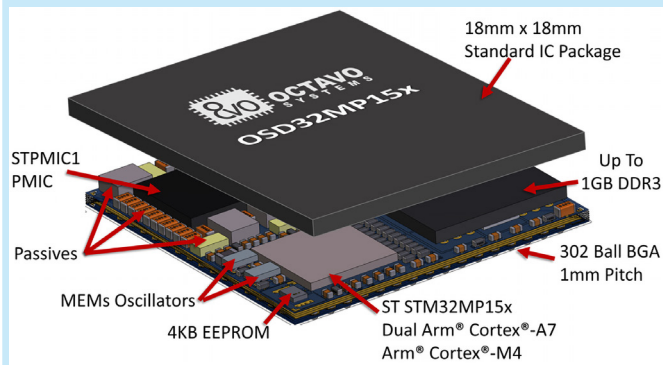
Moduł nRF9160 SiP integruje procesor ARM Cortex-M33, modem LTE, układ GPS, układy peryferyjne i zarządzanie zasilaniem w obudowie LGA o rozmiarach 10×16×1,2 mm. Moduł nRF9160 oferuje kompletne rozwiązanie do pracy z komunikacją mobilną IoT. Wymaga tylko zewnętrznej baterii, karty SIM oraz anteny [8].

Moduł nRF9160 SiP jest pierwszym układem do mobilnej komunikacji IoT z najnowszym rdzeniem Cortex M-33 firmy Arm. Jest też pierwszym układem, który wykorzystuje najnowszą technologię Arm TrustZone oraz Arm CryptoCell 310. Technologia Arm TrustZone oznacza, że moduł ma obszary zabezpieczone oraz niezabezpieczone. Aspekty krytyczne, jak obsługa kryptograficzna i klucze, mogą być umieszczone w obszarze zabezpieczonym, do którego nie ma bezpośredniego dostępu. Zapewnia to najwyższy poziom szyfrowania i zabezpieczeń aplikacyjnych na rynku. Obie technologie zapewniają również bardzo energooszczędną pracę.

Moduł nRF9160 SiP jest jednym



Rysunek 6. Moduł nRF9160 SiP firmy Nordic Semiconductor [8]



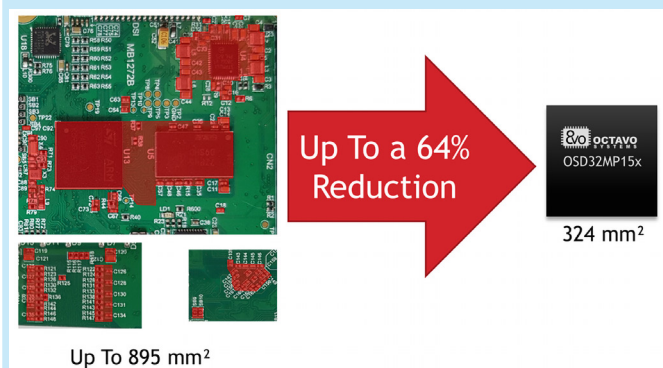
Rysunek 7. Moduł OSD32MP1 firmy Octavo [3]

z pierwszych produktów, które otrzymały certyfikat PSA Certified Level 1 w ramach nowej inicjatywy bezpieczeństwa Platform Security Architecture firmy ARM.

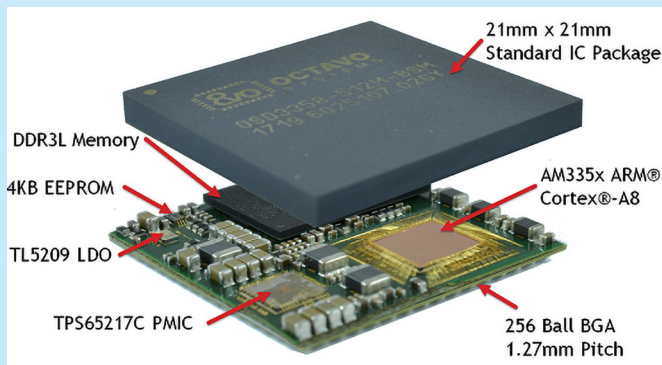
Moduł nRF9160 SiP posiada certyfikację Global Certification Forum (GCF), oprócz certyfikacji FCC i CE. Oznacza to zgodność ze specyfikacją 3GPP LTE oraz możliwość pracy z operatorami na całym świecie [8]. Gotowy do wstawienia do urządzenia, certyfikowany moduł umożliwia szybkie wprowadzanie na rynek produktów z tym modulem. Rynek IoT jest bardzo duży (jak na przykład mierniki energii), lecz obsługiwany przez setki różnych firm, często operujących tylko na rynku jednego kraju. Przy ich ograniczonych możliwościach istotna jest łatwość wdrażania i obsługi produktów z komunikacją LTE.

Moduł OSD32MP1 firmy Octavo Systems Układ STM32MP1 firmy STMicroelectronics jest wielordzeniowym układem (SoC). Dwurdzeniowy procesor Cortex-A7 o częstotliwości 650 MHz może obsługiwać systemy operacyjne takie jak Linux. Rdzeń Cortex-M4 o częstotliwości 209 MHz zazwyczaj uruchamia aplikację z systemem RTOS. Rdzeń GPU 3D obsługuje OpenGL ES2.0. Układ zawiera układy peryferyjne cyfrowe i analogowe, w tym podwójne, 22-kanałowe, 16-bitowe przetworniki ADC i podwójne 12-bitowe przetworniki cyfrowo-analogowe. Zabezpieczenie ARM TrustZone zapewnia bezpieczne uruchamianie i sprzętowe przyspieszenie kryptograficzne. Układ STM32MP1 również otrzymał certyfikat PSA w ramach inicjatywy bezpieczeństwa IoT firmy ARM. Obejmuje to obsługę interfejsu API, dostarczając programistom standardowy interfejs bezpieczeństwa do podstawowego sprzętu.

Ale do działania układu STM32MP1 potrzeba czegoś więcej niż PCB. Główna trudność projektowania płytki drukowanej dla układu STM32MP1 dotyczy dołączenia szybkich komponentów, takich jak pamięć DRAM. W tym celu firma Octavo Systems zintegrowało SoC ze wszystkimi niezbędnymi komponentami w rozwiązaniu systemowe w postaci modułu SiP o nazwie OSD32MP1 (rysunek 7). Ten pakiet w standardowej obudowie BGA302 o wymiarach 18×18 mm ma podobny rozmiar jak sam układ scalony



Rysunek 8. Oszczędności projektowe uzyskane dzięki zastosowaniu modułu OSD32MP1 [3]



Rysunek 9. Moduł OSD335X-SM firmy Octavo [4]

w standardowej obudowie. Ale daje znaczne korzyści, w tym uproszczenie projektu płytki drukowanej systemu oraz zapewnia wymagania taktowania i zasilania układu SoC. Zawiera również 1 GB pamięci DDR3L oraz 4 kB EEPROM [3].

Redukcja rozmiaru jest znacząca (rysunek 8). Niewielki układ Flash z łączem szeregowym do przechowywania programów to wszystko, co jest potrzebne do działania systemu. Takie podejście pozwala projektantom na stworzenie bardzo kompaktowego systemu [3].

Moduł OSD335X – firmy Octavo Systems Kolejny przykład modułu SiP to OSD335X-SM firmy Octavo Systems (rysunek 9). Pakiet integruje ponad 100 komponentów, w tym procesor Sitara AM335x z rdzeniem ARM Cortex-A8 firmy Texas Instruments. Procesor Sitara AM335x (1 GHz) może działać pod Linuxem, Androidem lub systemem RTOS. Zawiera kontroler ekranu dotykowego z systemem grafiki 3D PowerVR SGX; USB OTG z PHY; podwójny Gigabit Ethernet; 8-kanałowy, 12-bitowy SAR ADC. Pakiet zawiera również do 1 GB pamięci DDR3L, 16 MB pamięci eMMC Flash, 4 kB EEPROM, układ zarządzania energią TPS65217C (PMIC), regulator LDO typu TL5209 oraz wszystkie niezbędne elementy pasywne. Do działania nie potrzeba żadnych zewnętrznych elementów, wystarczy zasilanie [4].

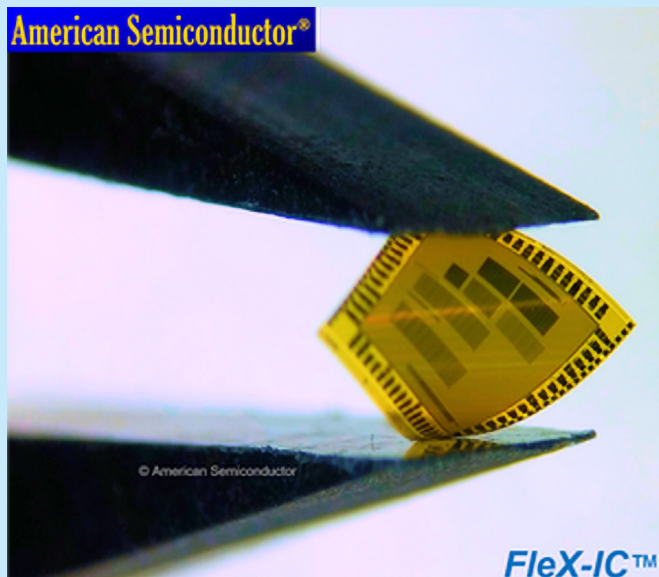
Moduł OSD335X-SM grupuje sygnały w celu uproszczenia płytki PCB. Pakiet ma obudowę BGA256 o rozmiarach 21×21 mm. Obudowa ma siatkę 16 na 16 kulek o podziałce 1,27 mm, która umożliwia prowadzenie ścieżek po jednej stronie płytki drukowanej. Pozwala to na zastosowanie pakietu na dwustronnej płytce drukowanej, dzięki czemu koszty systemu są niskie. Pakiety OSD335X-SM są używane w popularnych płytkach uruchomieniowych BeagleBone [4].

Pakiet dobrze nadaje się do realizacji węzłów sensorowych IoT wymagających natychmiastowej analizy danych oraz podejmowania decyzji a także do budowy bramek dostępowych z obsługą chmury obliczeniowej [4].

Pakiet OSD335X-SM reklamowany jest jako kompletny komputer w obudowie 27 mm², rozmiaru standardowego klocka LEGO.

Układy Silicon-on-Polymer (SoP)

FleX Silicon-on-Polymer to rewolucyjny proces tworzenia na elastycznym podłożu układów scalonych CMOS z jedną strukturą silikonową oraz z metalowymi połączeniami pomiędzy warstwami. FleX umożliwia tworzenie nowej generacji wydajnych, trwałych, elastycznych układów scalonych, które znacznie zwiększają możliwość integracji funkcjonalności CMOS z elastyczną elektroniką (rysunek 10). FleX dostarcza w pełni funkcjonalne, elastyczne płytki wafla o końcowej grubości krzemu tak cienkiej jak 2000 Å (angstrémów). FleX można zastosować do procesów technologii SOI. FleX daje nowe możliwości pakowania i integracji 3D układów scalonych. FleX został zastosowany zarówno w skali wafla, jak i do montażu na nieregularnej powierzchni. Wyniki testu tej samej matrycy jako płytki pełnej grubości i płytki waflowej wykazują niewielkie zmiany parametrów elektrycznych, a niektóre parametry ulegają poprawie [10].



Rysunek 10. Elastyczny układ scalony krzemowo-polimerowy [10]

Układ AS_NRF51 Flex-BLE firmy American Semiconductor Nowy układ scalony AS_NRF51 Flex-BLE firmy American Semiconductor jest zupełną nowością na rynku IoT (informacja z 20.04.2019) [11].

AS_NRF51 Flex-BLE jest ultracienką wersją układu scalonego nRF51822 firmy Nordic Semiconductor. Układ nRF51822 jest dotychczas dostępny w najmniejszej obudowie WL-CSP o rozmiarach 3,8×3,8 mm.

Do produkcji układu scalonego AS_NRF51 Flex-BLE została zastosowana technologia Flex SoP firmy American Semiconductor. Grubość pakietu krzemowego została zmniejszona do około 35 μm – o połowę mniejszą niż ludzki włos. Dodatkowa warstwa polimerów z przodu i z tyłu zapewnia wytrzymałość mechaniczną, co umożliwia wyginanie układu bez złamania [11].

Układ AS_NRF51 Flex-BLE zawiera procesor ARM Cortex – M0+, 256 KB pamięci Flash, 32 KB pamięci RAM, koprocesor kryptograficzny, czujnik temperatury oraz 10 b przetwornik ADC. Układ

pracuje z napięciami zasilania od 1,8 V do 3,6 V. Układ radiowy obsługuje komunikację w standardzie Bluetooth 4.2 z certyfikowanym stosem komunikacyjnym. Widok struktury układu scalonego został pokazany na rysunku tytułowym [11].

Układ scalony został zaprojektowany z myślą o rozwiązaniach, które wymagają ultramałej grubości, elastyczności fizycznej i wysokiej niezawodności w zastosowaniach od urządzeń noszonych i logistyki po Internet Rzeczy (IoT).

Bardzo istotną zaletą nowego układu jest zgodność z układem nRF51822 firmy Nordic Semiconductor. Umożliwia to wykorzystanie gotowego środowiska programowego, pakietu oprogramowania pomocniczego i stosów protokołów. Upraszcza to opracowywanie urządzeń z nowym układem.

Podsumowanie

Oferta układów dla IoT bardzo szybko się zmienia. To co dzisiaj jest najnowszym rozwiązaniem, za pół roku może być już wycofane z produkcji. Lub odwrotnie, dobre rozwiązanie może zostać zintegrowane z innym, też dobrym. Przykładem jest moduł Monarch SQN66430 SiP firmy Sequans.

Projektowanie urządzeń z zastosowaniem modułów SiP może skrócić czas wprowadzania na rynek. Podstawową zaletą użycia modułu SiP jest brak konieczności certyfikowania systemu przed wprowadzeniem na rynek. Moduły wiodących producentów mają certyfikację praktycznie na cały świat. Zastosowanie modułu SiP ułatwia projektantom użycie najnowszych technologii, bez konieczności zdobywania wiedzy w obszarach, w których projektanci SiP zapewniają dobre rozwiązanie.

Dobre rozwiązanie może stać się również podstawą do realizacji w nowej technologii, uzyskując zupełnie zaskakujące właściwości. Elastyczny, wytrzymały i ultracienki układ scalony AS_NRF51 Flex-BLE oferuje łączność Bluetooth Low Energy w najcieńszej na świecie obudowie. Powstał idealny układ do realizacji zaawansowanej elektroniki noszonej (ubraniowej).

Henryk A. Kowalski
Instytut Informatyki
Politechnika Warszawska

Wybrane pozostałe artykuły kursu „Systemy dla Internetu Rzeczy”

[S22] Układy scalone z obsługą mobilnej komunikacji IoT

Literatura

- [1] 11 Myths About SiP, Lee Smith, Electronic Design, Sep 05, 2018 <http://bit.ly/30hGeof>
- [2] An Examination of LPWAN Technology in IoT, Jefferson Chua, Daniel Yang, Electronic Design, Oct 31, 2018 <http://bit.ly/30fbxzk>
- [3] System-in-Package Simplifies Multicore SoC Deployment, William G. Wong, Electronic Design, Mar 05, 2019 <http://bit.ly/2Heazwd>
- [4] SIP Solutions Streamline System Design, William G. Wong, Electronic Design, Mar 08, 2018 <http://bit.ly/30drVRy>
- [5] Układy scalone z obsługą Bluetooth 5, Henryk A. Kowalski, „Elektronika Praktyczna”, 5/2018 <http://bit.ly/2W07CYu>

[6] Internet of Things, HiSilicon <http://bit.ly/2Hfp2bg>

[7] ON Semiconductor Expands Bluetooth 5 Radio Family with System-in-Package (SiP) Module for Easier Development of Smart Connected Applications, Audio Express, 13 September 2018 <http://bit.ly/2WD5pPz>

[8] nRF9160 SiP, Low power System-in-Package with integrated LTE-M/NB-IoT modem and GPS, Nordic Semiconductor <http://bit.ly/2WD2N4o>

[9] LTE-M/NB-IoT System-in-Package, Sequans Communications <http://bit.ly/2Hfq9Yu>

[10] Flex-ICs: Silicon-on-Polymer Products, American Semiconductor <http://bit.ly/2VkyEFA>

[11] Flexible, robust, and ultra-thin IC offers Bluetooth Low Energy connectivity in world's thinnest form factor, 23 Apr 2019, Oslo, Norway, Nordic Semiconductor <http://bit.ly/2Ync54W>

REKLAMA

www.ep.com.pl