

Створені за технологією SOTB мікроконтролери Renesas працюють на енергії, яку отримують із навколишнього середовища

У статті описано переваги та особливості SOTB-технології та представлено мікроконтролер з її застосуванням — RE017 від компанії Renesas.

Після аварії на атомній станції Фукусіма за ініціативою японського уряду було засновано асоціацію LEAP (*Lowpower Electronics Association and Project*) для розроблення технології, що передбачає зниження споживання енергії в цілому ряді сфер застосування як на споживчому, так і на промисловому ринку Японії.

Однією з перших розробок у рамках цієї програми стала технологія, відома як SOTB (*Silicon On Thin Buried Oxide* — кремній на поглибленому оксидному шарі). Її було створено на основі технологічного процесу FD-SOI (*Fully Depleted Silicon on Isolator* — повністю збіднений кремній на ізоляторі), який наразі повсюдно використовують для випуску високопродуктивних систем на кристалі (*SoC, System on Chip*) і спеціалізованих мікросхем масового

призначення (*ASSP, Application Specific Standard Products*). Вироби, виконані за технологічним процесом FD-SOI, характеризуються високим рівнем інтеграції та високими тактовими частотами, у зв'язку з чим мають високий струм споживання ($I_{\text{потр}}$, МГц), і, як правило, у них відсутня вбудована пам'ять.

Технологію SOTB спеціально розробляли для створення мікроконтролерів із наднизьким енергоспоживанням, призначених для проектування високоєфективних рішень, що використовують енергію навколишнього середовища — наприклад, сонячну енергію, вібрацію, різницю тиску й температури. Такі МК можуть запропонувати, з одного боку, високу продуктивність і великий обсяг пам'яті, а з іншого — надзвичайно низькі рівні струму як в активному режимі, так і в режимі очікування, що є оптимальним для

застосування в пристроях, які отримують енергію з навколишнього середовища.

Більшість сучасних мікроконтролерів розробляють за допомогою КМОН-технології з роздільною здатністю менше ніж 40 нм (рис. 1). У цьому разі перевагою є можливість отримати МК з вищим рівнем інтеграції периферії, з великими обсягами флеш-пам'яті ємністю понад 2 Мбайт, що працюють з тактовою частотою понад 200 МГц. Оскільки активний струм перемикачів для таких технологій зазвичай дуже низький, приблизно 50–100 мкА/МГц, а струм витікання кожного затвора за таких малих розмірів дуже високий, це призводить до високих струмів у режимі очікування, що становлять 10–100 мкА. Для сфер застосування, де передбачені акумулятори або процес збору енергії з навколишнього середовища, мінімальні струми витікання, як і низькі струми в режимі очікування, стають найбільш важливими параметрами.

Технологія SOTB дає змогу розробляти мікроконтролери зі струмами в активному режимі менше ніж 20 мкА/МГц

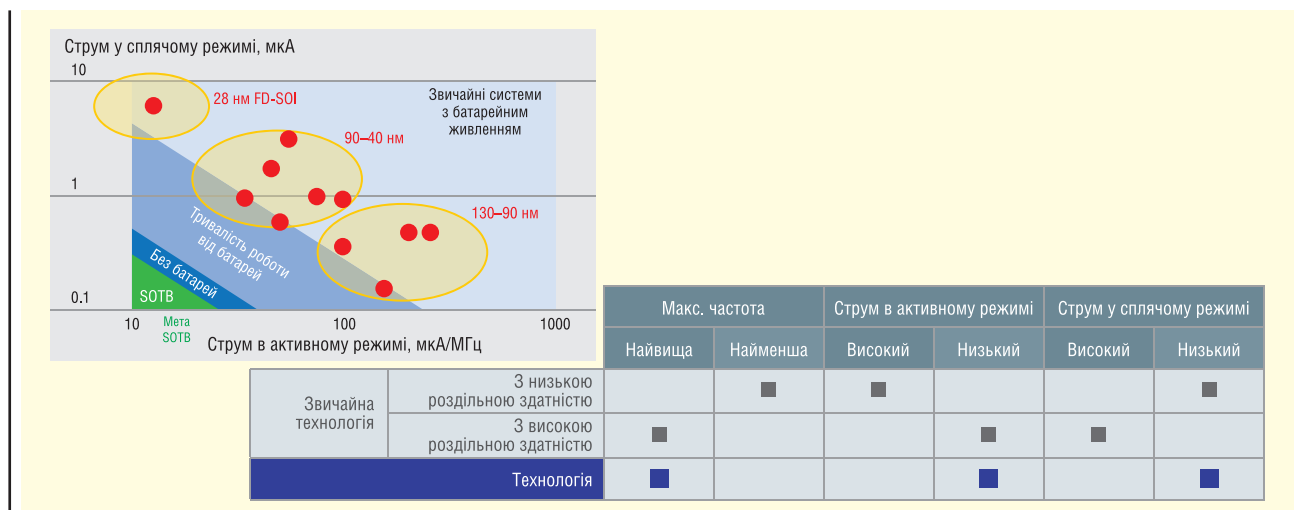


Рис. 1. Види технологій виробництва мікросхем із зазначенням струмів в активному режимі та струмів витікання

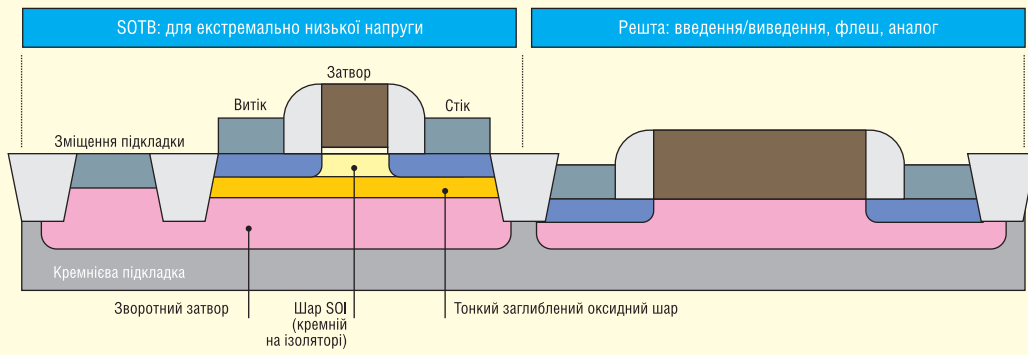


Рис. 2. Гібридна структура SOTB

і струмами витікання менше ніж 150 нА, а також із високою тактовою частотою та великим об'ємом вбудованої флеш-пам'яті та SRAM.

Одним із найважливіших досягнень є отримання гібридної кремнієвої структури, на якій можна поєднати переваги технології SOTB і стандартної технології на основі кремнію. Поява гібридної структури означає, що можна використовувати технологію SOTB для затворів CPU і периферійних пристроїв, і застосувати стандартні затвори на монокристалі кремнію для функцій введення/виведення і аналогових компонентів, де потрібна вища напруга. Тому розробники можуть без проблем працювати з цими мікроконтролерами, оскільки їхні електричні характеристики відповідають параметрам стандартних сучасних МК.

На рисунку 2 показано гібридну структуру SOTB і переваги конструкції затвора SOTB. У конструкції затворів традиційної КМОН-технології доводиться проводити легування каналу або вводити атоми домішок у кремній під час виробничого процесу. Дуже важко точно відстежити кількість атомів, вве-

дених у кожен затвор, це призводить до того, що порогові характеристики затворів можуть сильно відрізнятися по всьому МК. Особливо суттєві проблеми з'являються в тих процесах, де кількість атомів, що вводяться, надзвичайно мала (не більше сотні штук).

Вирішити цю проблему вдалося за допомогою бездомішкової конструкції каналу: характеристиками затвора можна керувати через надтонкий оксидний шар у затворі, який дуже добре контролюється і дуже точно відтворюється по всьому МК. Це означає, що відхилення між каналами значно менше, ніж у традиційній монокристалічній конструкції. Як буде показано, зниження варіативності між затворами з використанням SOTB дає змогу значно знизити робочу напругу, а отже, і енергію, необхідну для перемикання затворів, а також скоротити рівень шумів і, відповідно, збільшити продуктивність.

Тонкий шар SOI забезпечує додатковий захист від збоїв, викликаних високоенергетичними частинками (космічними променями), а тому частота збоїв програмного забезпечення на цих пристроях значно нижча.

На рисунку 3 показано ще одну перевагу технології SOTB, яка дає змогу подавати напругу з від'ємним зсувом до кожного затвора, що дає можливість керувати порогамі перемикання кожного затвора індивідуально або всіх затворів одночасно.

На рисунку 3 наведено порівняння SOTB і стандартної технології на монокристалі кремнію. Тут можна побачити конструкцію затвора SOTB з нижнім затвором, який використовується для керування витіканнями, шар SOI і бездомішковий канал, що дає змогу знизити варіативність і, отже, домогтися наднизьких струмів в активному режимі.

На графіку на рисунку 3 показано порогові значення напруг для затвора стандартної КМОН-технології та SOTB. Червона лінія відображає низку характеристик перемикання для технології на монокристалі кремнію. Тут можна побачити варіативність у порозі перемикання: затвори з найкращим легуванням перемикатимуться при значенні 0.3 В, у той час як затвори з найгіршим легуванням, у зв'язку з притаманною цій технології варіативністю, перемикатимуться десь у районі 0.7 В.

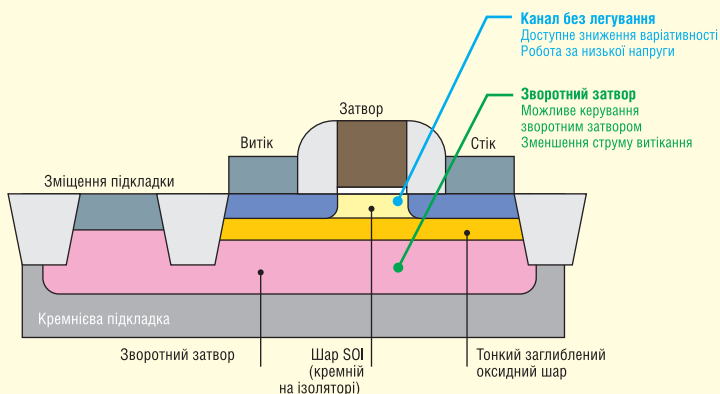
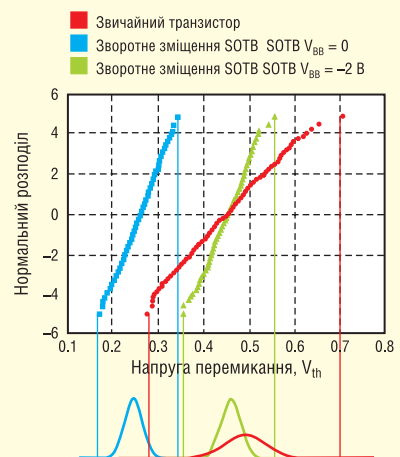


Рис. 3. Порівняння SOTB і стандартної КМОН-технології



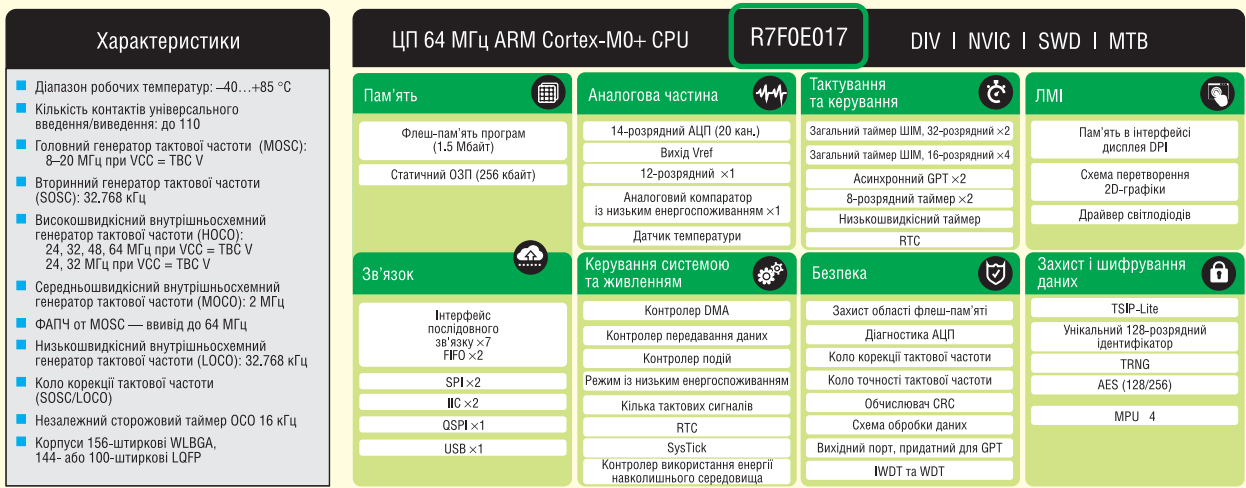


Рис. 4. Блок-схема RE017

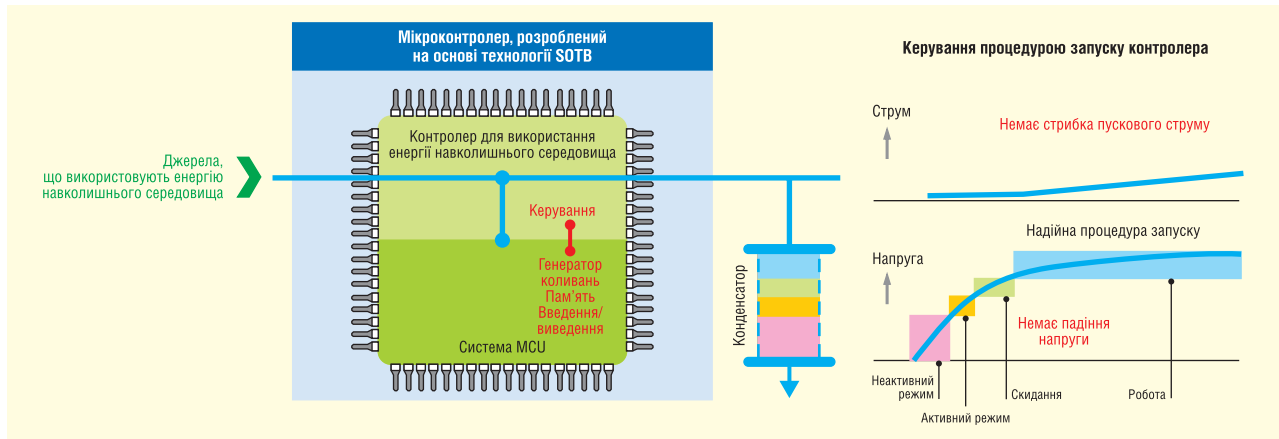


Рис. 5. Схема роботи RE017

Для точного реагування кожного затвора необхідно працювати на рівні напруги, що значно перевищує 1 В, що безпосередньо впливає на енергоспоживання пристрою. Синя лінія на рисунку 3 показує помітне зниження варіативності та вузький діапазон характеристик перемикачів. З пристроями на базі технології SOTB з'явилася можливість безпечно працювати з нижчими напругами, а кожен затвор функціонує правильно, забезпечуючи істотне зниження величини енергії, що споживається в активному режимі. Зелена лінія на рисунку 3 демонструє результат подачі напруги негативного зміщення. Тут можна ввести затвори в стан наднизького витоку струму, таким чином значно зменшуючи струм у режимі очікування.

Першим мікроконтролером корпорації Renesas, що виконаний із застосуванням технології SOTB, став RE017. Ним було започатковано лінійку мікроконтролерів RE сімейства Zero Energy. RE017 містить ядро Cortex M0+, що працює на тактовій частоті до 64 МГц, периферію з високим ступенем інтеграції, а також до 1.5 Мбайт флеш-пам'яті та 256 кбайт SRAM. Блок-схему мікроконтролера RE017 наведено на рисунку 4.

Мікроконтролери на базі технології SOTB мають відмінні характеристики низького енергоспоживання:

- струм в активному режимі: 20–35 мкА/МГц;
- струм у режимі очікування: 140 нА;
- АЦП у роботі: 4 мкА при 32 кГц;

- 256 кбайт SRAM зі струмом споживання 1 нА/кбайт у режимі очікування.

Мікроконтролер RE017 із флеш-пам'яттю великого об'єму та SRAM і наднизьким рівнем енергоспоживання є оптимальним для широкої низки застосувань, де акумулятор або інше джерело живлення не можна використовувати й енергія надходить від навколишнього середовища. Також існує можливість керувати зовнішніми акумуляторами або конденсаторами великої ємності для забезпечення резервованого електроживлення.

Під час розроблення пристроїв, що використовують енергію довкілля, одним із головних завдань є подання необхідного рівня струму в момент пуску (рис. 5). Найчастіше джерело живлення видає дуже малі струми, до того ж звичайний мікроконтролер під час пуску споживає значно вищий струм, тому для розв'язання цієї проблеми RE017 здатний керувати пусковим струмом, а також процесом запуску загалом.

RE017 від Renesas може працювати на цілій низці альтернативних джерел енергії, включно з сонячною енергією, вібрацією, різницею тисків і температури. Він здатний повністю керувати циклічною процедурою виходу з режиму очікування, використовуючи тільки наднизький струм від джерела, забезпечує внутрішній захист від стрибків пускового струму і може діяти на дуже низьких значеннях напруги, щоб уникнути збою під час запуску. Поєднання низького енергоспоживання, великого обсягу пам'яті, а також високої продуктивності дає змогу розробляти унікальні електронні пристрої.