

# Skalowanie układów scalonych

Technologia mikroelektroniczna



## Charakterystyczne parametry

- najmniejszy realizowalny rozmiar (*ang. feature size*),
- liczba bramek (układów) na jednej płytce,
- wydzielana moc,
- maksymalna częstotliwość pracy,
- wymiar płytki (powierzchnia struktury),
- koszty produkcji.

# Wzrost stopnia scalenia można uzyskać poprzez :

- zwiększanie powierzchni struktury
  - do tej pory następował powoli
- nowe rozwiązania układów elementarnych
  - od wielu lat nie są wprowadzane
- zmiany reguł projektowania z uwagi na zmniejszanie wymiarów charakterystycznych
  - są głównym czynnikiem wzrostu stopnia scalenia

Zmniejszanie wymiarów topografii układu scalonego nazywane jest procesem skalowania

# Modele skalowania

**Proporcjonalne zmiany pewnych parametrów pozwalają zachować np. stałe natężenie pola elektrycznego**

**stopniowa miniaturyzacja przyrządów nie zmienia warunków fizycznych ich pracy**

**można stosować te same modele opisujące działanie przyrządów**

# Modele skalowania

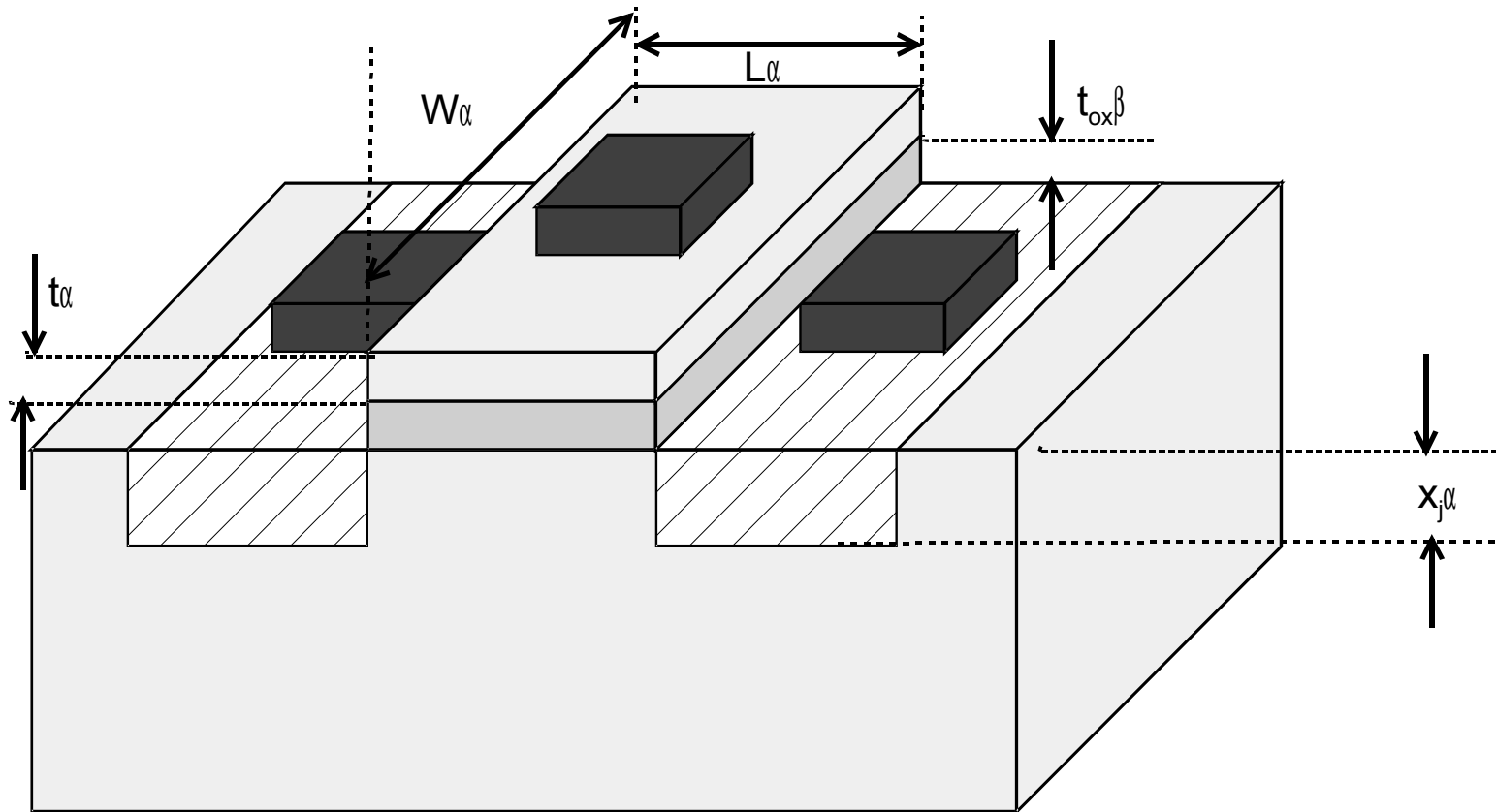
## 1. Model stałego natężenia pola elektrycznego

Oparty na warunku zachowania stałego pola

- wszystkie wymiary liniowe - poziome i pionowe oraz napięcia są pomnożone przez ten sam współczynnik zwany współczynnikiem skalowania  $\alpha$
- zmiana  $\alpha$  razy napięć polaryzujących i  $1/\alpha$  razy koncentracji domieszek powoduje zmianę  $\alpha$  razy szerokości warstw zubożonych

## 2. Model stałego napięcia zasilania

# Skalowanie tranzystora MOS



# Technologia GaAs

Szybkość i rozmiar przyrządów półprzewodnikowych są ściśle ze sobą związane

ograniczona ruchliwość nośników

240  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  dla dziur  
650  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  dla elektronów

Nasycenie prędkości nośników jest zjawiskiem ograniczającym prędkość przyrządów półprzewodnikowych wykonanych w technologii krzemowej

związki III i V oraz II i VI grupy układu okresowego.

arsenek galu (GaAs)

związki III-V

- ◆ fosforek galu
- ◆ azotek galu

pierwiastki IV grupy

- ◆ krzemogerman
- ◆ węgiel krzemu (SiC)



Arsenek galu może być wykorzystany w przypadku układów wymagających bardzo dużej prędkości działania.

Obecnie jest on stosowany głównie

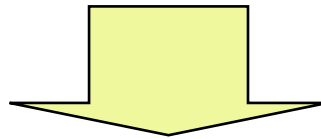
- w układach mikrofalowych
- układach cyfrowych

# Zalety GaAs

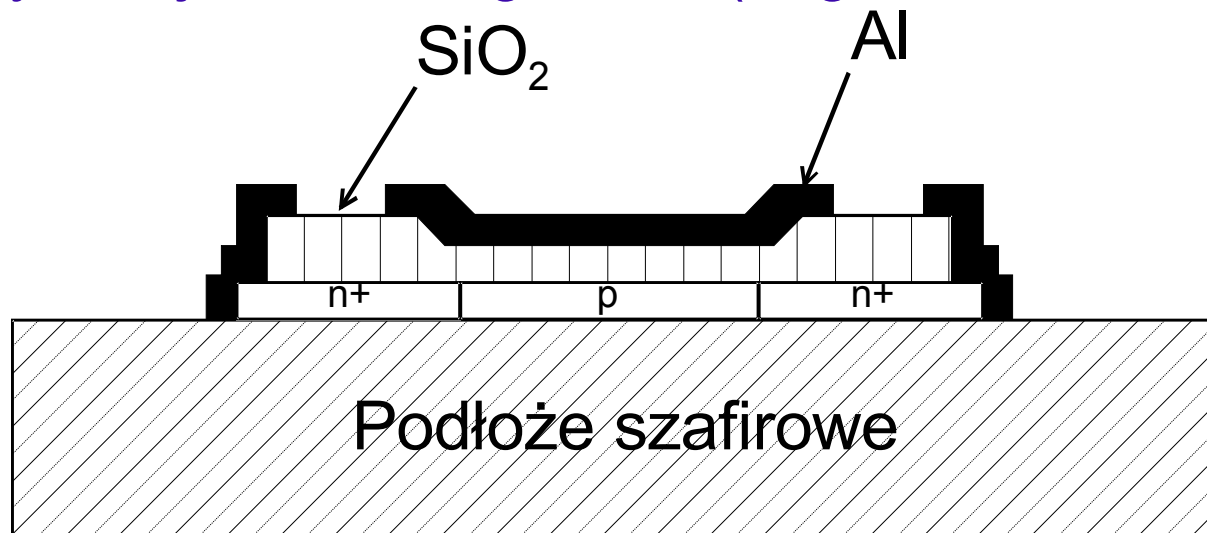
- ◆ duża ruchliwość elektronów  
*6÷7 razy większa niż w krzemie*
- ◆ półizolacyjne podłoże  
*o rezystywności rzędu  $10^7 \div 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$   
zapewniające niewielkie pojemności pasożytnicze  
i łatwiejszą izolację elektryczną wielu przyrządów  
umieszczonych na tym samym podłożu*
- ◆ 1.4 raza większa prędkość nasycenia nośników  
niż w krzemie

- ◆ **dobre własności optoelektryczne**  
*złącze p-n spolaryzowane w kierunku przewodzenia może być używane jako źródła światła*
- ◆ **odporność na promieniowanie**  
*jest dużo większa z powodu braku ładunków pułapkowanych w tlenku bramkowym*
- ◆ **szerszy zakres temperatur pracy**  
*dzięki szerszej przerwie energetycznej. Przyrządy z arsenku galu mogą pracować w zakresie temperatur od -200 do +200°C*
- ◆ **straty mocy**  
*mniejsze o 70% niż w najszybszej technologii krzemowej - ECL*

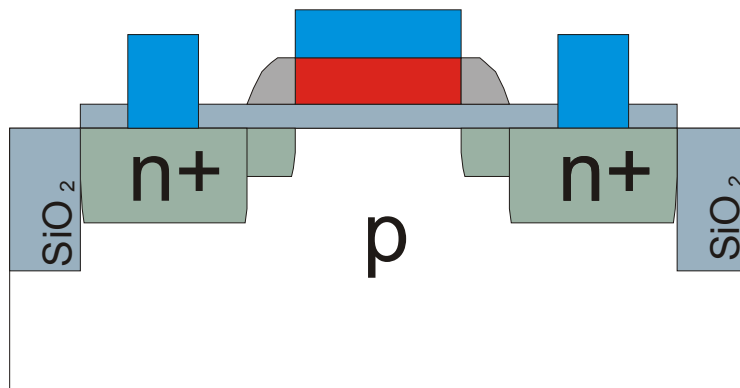
# Technologia Silicon on Insulator (SOI)



Kontynuacja technologii SOS (ang. Silicon on Sapphire)

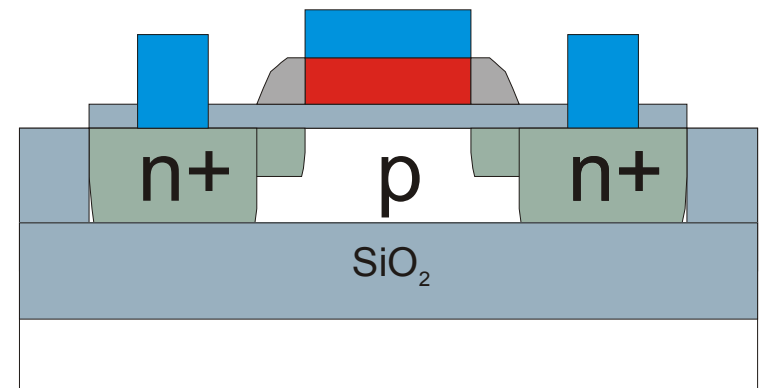


# Struktura tranzystora SOI



a)

tranzystor NMOS ze  
ścianami izolacyjnymi



b)

tranzystor NMOS w technologii SOI

# Technologia SOI

Przyrządy półprzewodnikowe wykonuje się w cienkiej warstwie krzemu oddzielonej od podłoża grubą warstwą tlenku zagrzebanego

Pełna izolacja przyrządów od podłoża i od siebie nawzajem

O odległości między nimi decyduje fotolitografia

# Zastosowanie technologii SOI

- ◆ urządzenia przenośne, jak telefony komórkowe, w których niskie zużycie energii jest bardzo istotne
- ◆ układy Smart Power ze względu na dobrą izolację
- ◆ układy pamięci RAM ze względu na dużą odporność na promieniowanie.

# Technologia węgliku krzemu (SiC)

## Graniczna temperatura pracy

- ◆ klasycznych przyrządów krzemowych wynosi ok. 300°C
- ◆ przyrządów MOS-SOI 400°C.

Wszędzie tam, gdzie temperatura pracy przyrządu przekracza te wartości musimy sięgać po GaAs lub węglik krzemu



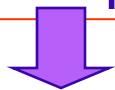
# Własności węgla krzemu (SiC)

- Porównywalna z krzemem ruchliwość elektronów
- dwukrotnie większa prędkość nasycenia nośników
- trzykrotnie większa przewodność cieplna

stanowią podstawę do wytwarzania przyrządów, które mogą pracować przy dużej gęstości mocy i przy dużych częstotliwościach

# Własności węgla krzemu (SiC)

- Jeden z najtwardszych znanych materiałów
- Duża stabilność termiczna i chemiczna
- Pola przebicia ~ 10x większe niż w krzemie
- Płytki podłożowe dostępne komercyjnie
- Możliwość wytwarzania wysokiej jakości tlenku  $\text{SiO}_2$
- Materiał podłożowy dla przyrządów III/V grupy



- Możliwość pracy w zakresie do 600 °C
- Parametry przyrządów pracujących w układach dużej mocy, wysokiej częstotliwości kilkaset razy lepsze niż krzemowych (teoretycznie)

# Technologia azotku galu (GaN)

W technologii azotku galu produkuje się komercyjnie diody świecące w kolorze niebieskim.

Technologia ta umożliwia wykonanie tranzystorów mocy pracujących w zakresie mikrofalowym, wytwarzanych na podłożu z węgliku krzemu ze względu na jego wysoką przewodność cieplną.

# Technologia azotku galu (GaN)

## Zastosowania komercyjne

- diody świecące LED (*light emitting diodes*)
- *GaN based technology*  
*np. AlInGaP, AlGaN/GaN, AlGaInN*

## Perspektywy



- Heterozłączone przyrządy mocy AlGaN/GaN pracujące w zakresie mikrofalowym

# Technologia krzemogermanu (SiGe)

Si - przerwa energetyczna 1.12 eV

Ge - przerwa energetyczna 0.66 eV

Stop SiGe - przerwa energetyczna

maleje o 7.5 meV na 1% zawartości Ge w Si



Inżynieria szerokości przerwy energetycznej

# Technologia krzemogermanu (SiGe)

Tranzystory Si/SiGe HBT mają doskonałe parametry:

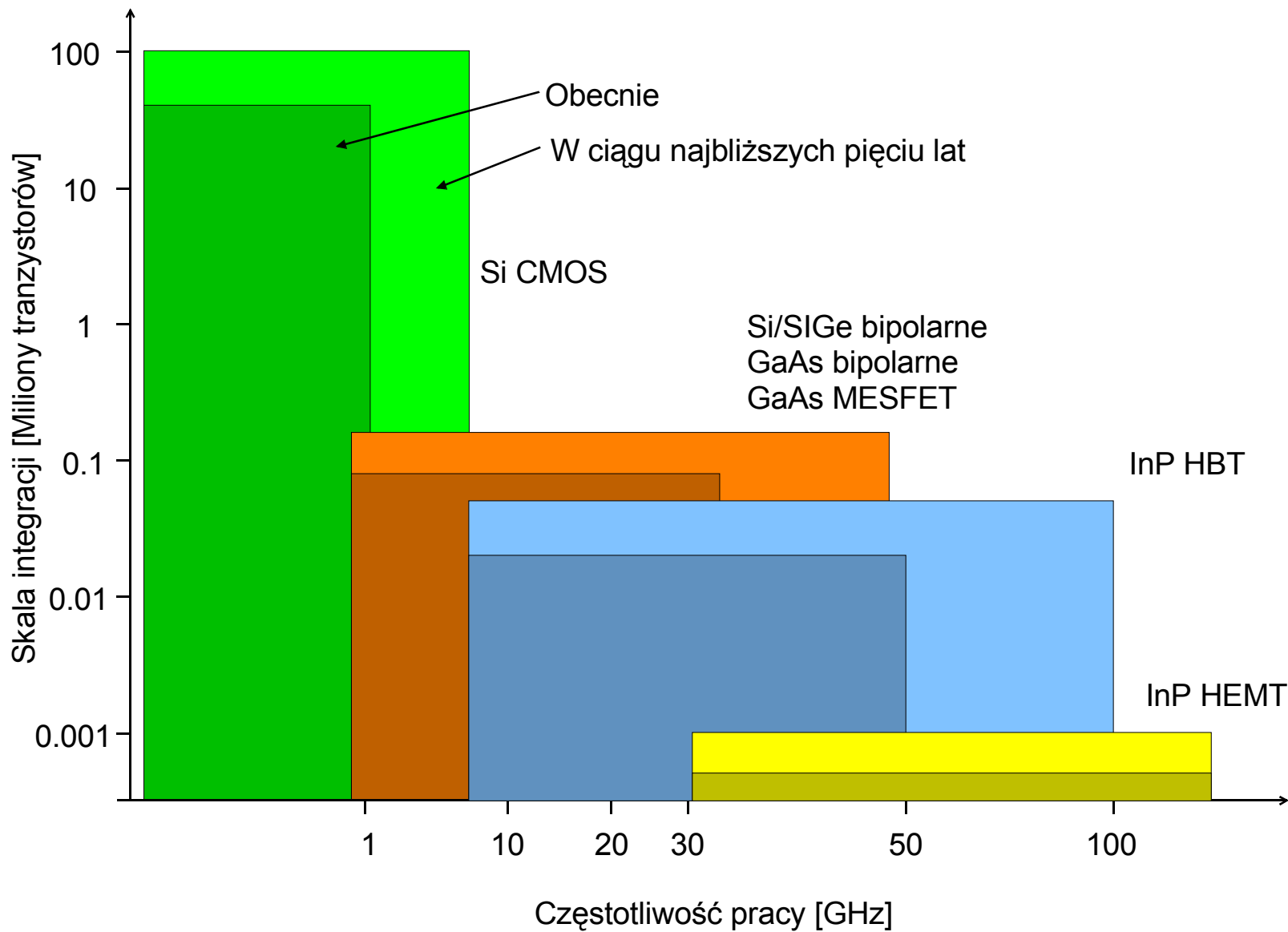
- duże wzmocnienie z dobrą liniowością
- niski poziom szumów
- maksymalna częstotliwość pracy do 65 GHz

W połączeniu z wysokiej jakości elementami pasywnymi daje to możliwość wykonywania szybkich układów analogowych zastępujących układy GaAs (telefonii komórkowa, sieci bezprzewodowe, GPS).

# Technologia fosforku indu (InP)

Zapewnia obecnie najwyższą częstotliwość pracy układów scalonych

Wytwarzane są z niego bardzo szybkie układy elektroniczne i diody laserowe używane m.in.. Do transmisji danych z szybkością ponad 40 Gb/s oraz ogniwa słoneczne





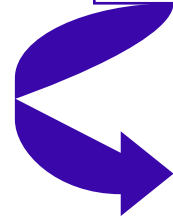
# Perspektywy

## Struktury mieszane

np. SiC+P+GaAs

np. duża moc+duża częstotliwość

SiC+GaN+ C



- ◆ Szerokość przerwy energetycznej 5.5 eV
- ◆ Prąd wsteczny  $10^{-89}$  A (Si - fA)
- ◆ napięcie przebicia 600V (Si – 60V)