

Après le GaN et le SiC, quels matériaux pour les composants de puissance ?

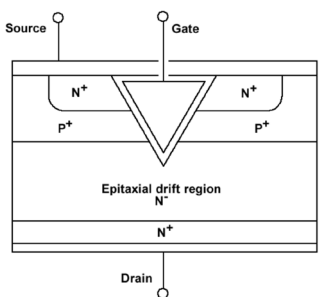
Frédéric MORANCHO morancho@laas.fr

Équipe ISGE

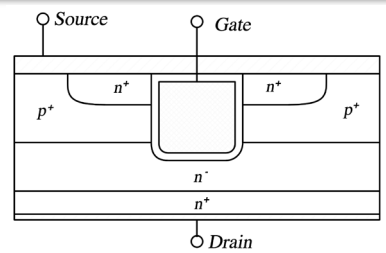
« Intégration des Systèmes de Gestion de l'Énergie »

Team leaders : Karine ISOIRD (kisoird@laas.fr) & Josiane TASSELLI (tasselli@laas.fr)

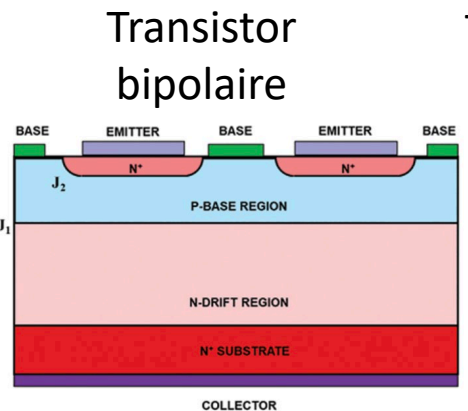
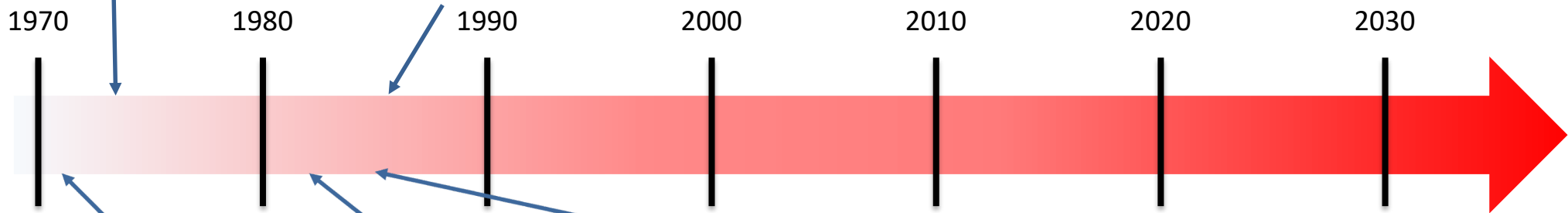
Composants de puissance : un peu d'histoire...



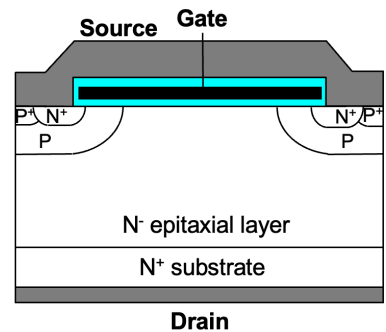
Transistor VMOS



Transistor UMOS
(trench MOSFET)



Transistor bipolaire

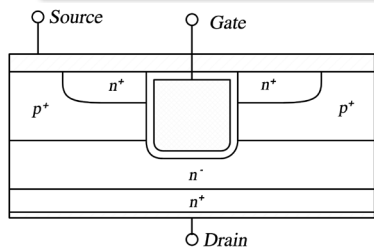


Transistor VDMOS

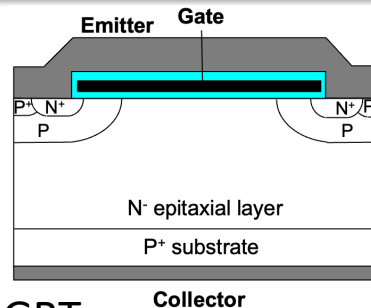
Au LAAS :

- Équipe « Composants bipolaires » : 1^{re} thèse CIFRE avec Motorola (J-M. Reynès) en 1984
- Équipe « Composants à effet de champ » : plusieurs thèses sur les tr. VDMOS

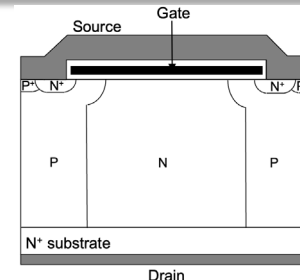
Composants de puissance : un peu d'histoire...



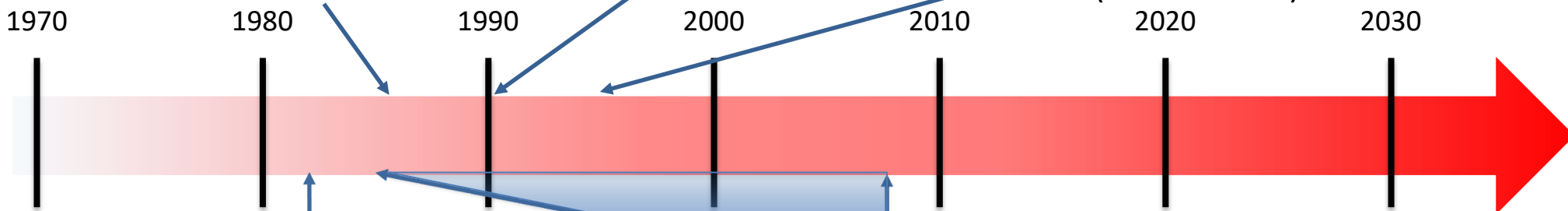
Transistor UMOS
(trench MOSFET)



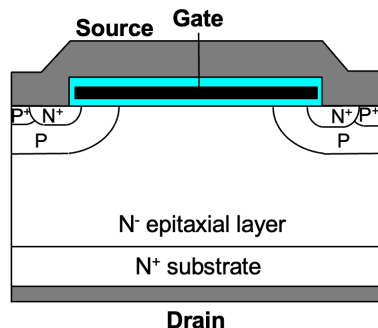
IGBT



Transistor SJ-MOS
(COOLMOS™)



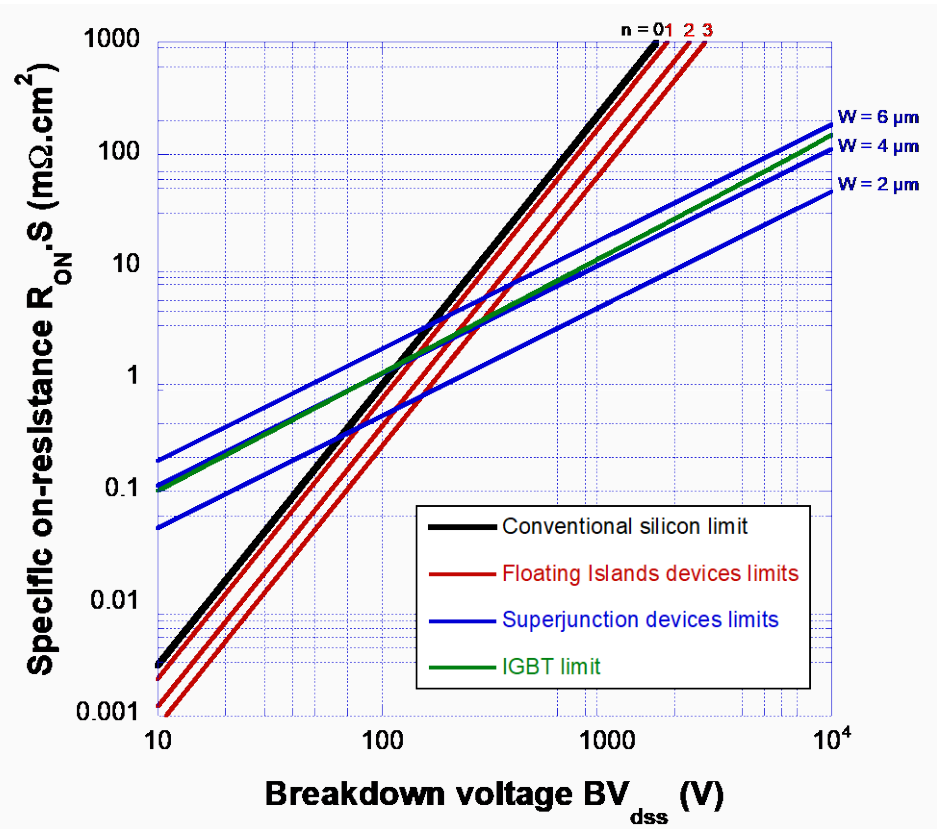
Transistor VDMOS



Au LAAS : équipe CIP (« Composants et Intégration de Puissance ») :

- Travaux sur les tr. VDMOS, UMOS, SJ-MOS avec Motorola / Freescale
- Travaux sur les comp. bipolaires (diodes, GTO, thyristor, IGBT) avec STMicroelectronics

Silicium : limites de performances des composants



Conventional silicon limit:

$$R_{ON} \cdot S (\Omega \text{cm}^2) = 8.9 \times 10^{-9} \times BV_{dss}^{2.4} \quad (\Omega \cdot \text{cm}^2)$$

Superjunction devices:

$$R_{ON} \cdot S (\Omega \text{cm}^2) = 1.98 \times 10^{-1} \times W^{\frac{5}{4}} \times BV_{dss} \quad (\Omega \cdot \text{cm}^2)$$

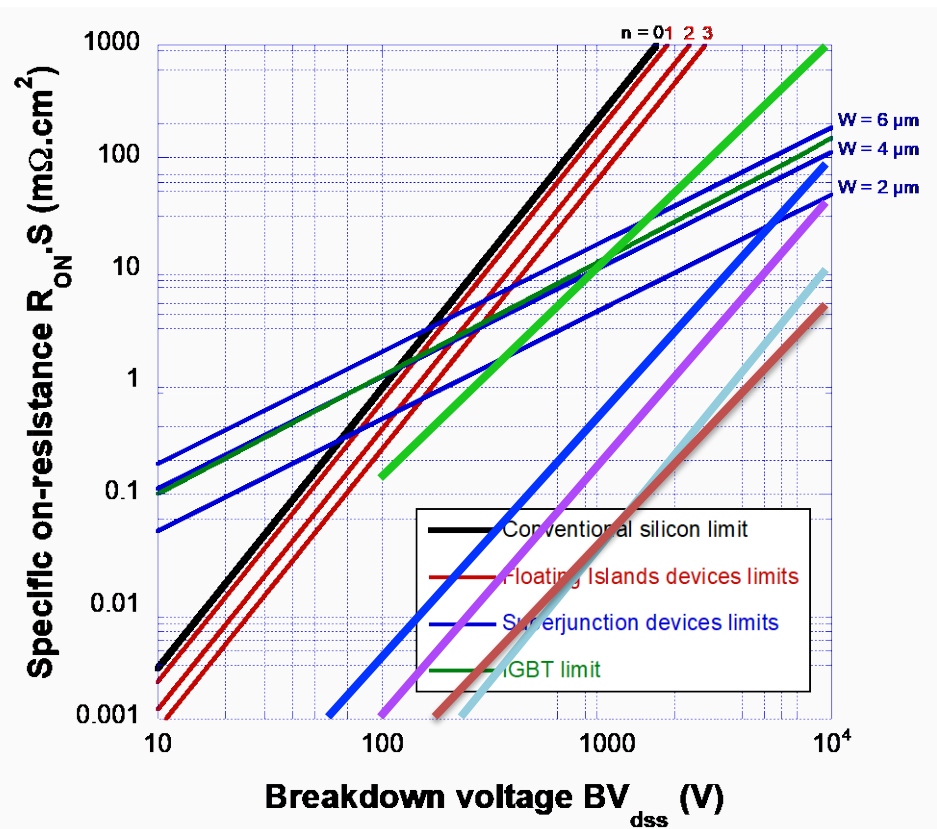
Floating Islands devices:

$$R_{ON} \cdot S (\Omega \text{cm}^2) = 1.78 \times 10^{-8} \times (n+1)^{1.4} \times (BV_{dss})^{2.4} \quad (\Omega \cdot \text{cm}^2)$$

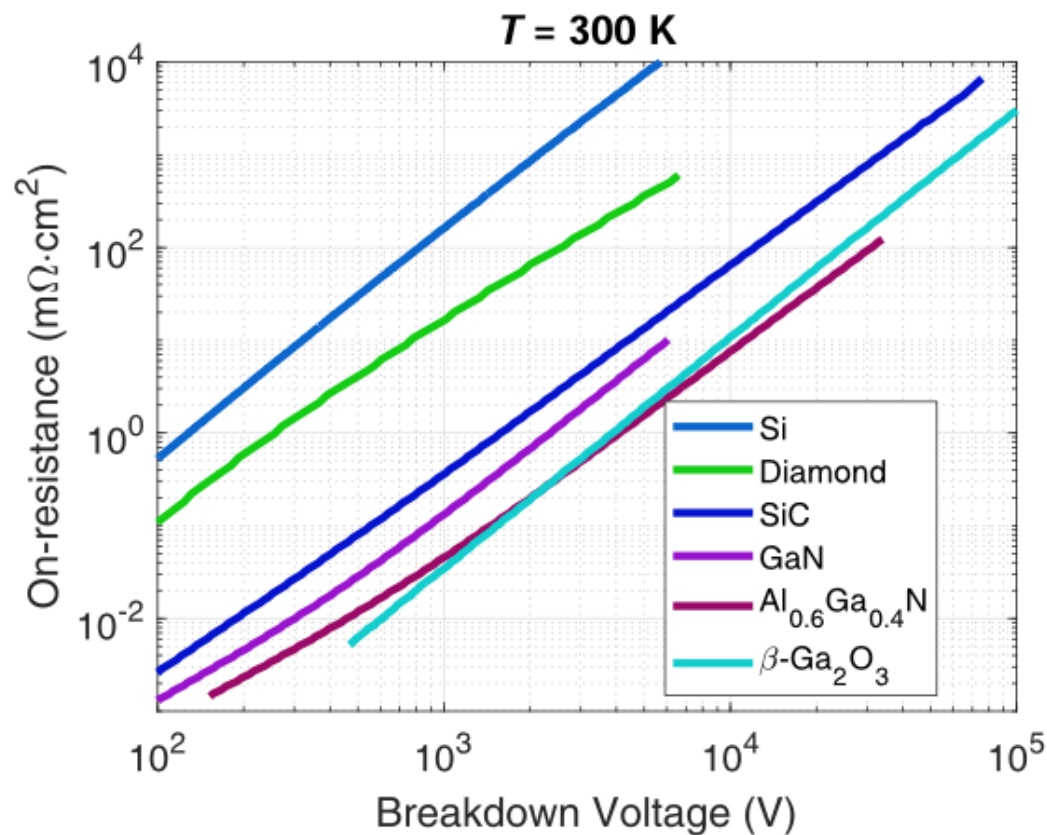
W = P and N layers width of Superjunction MOSFETs
n = number of floating islands of FLYMOSFETs

➔ de nombreuses limitations (physiques, thermiques, technologiques,...) affectent les performances des composants de puissance en silicium

WBG : vers un rupture des performances



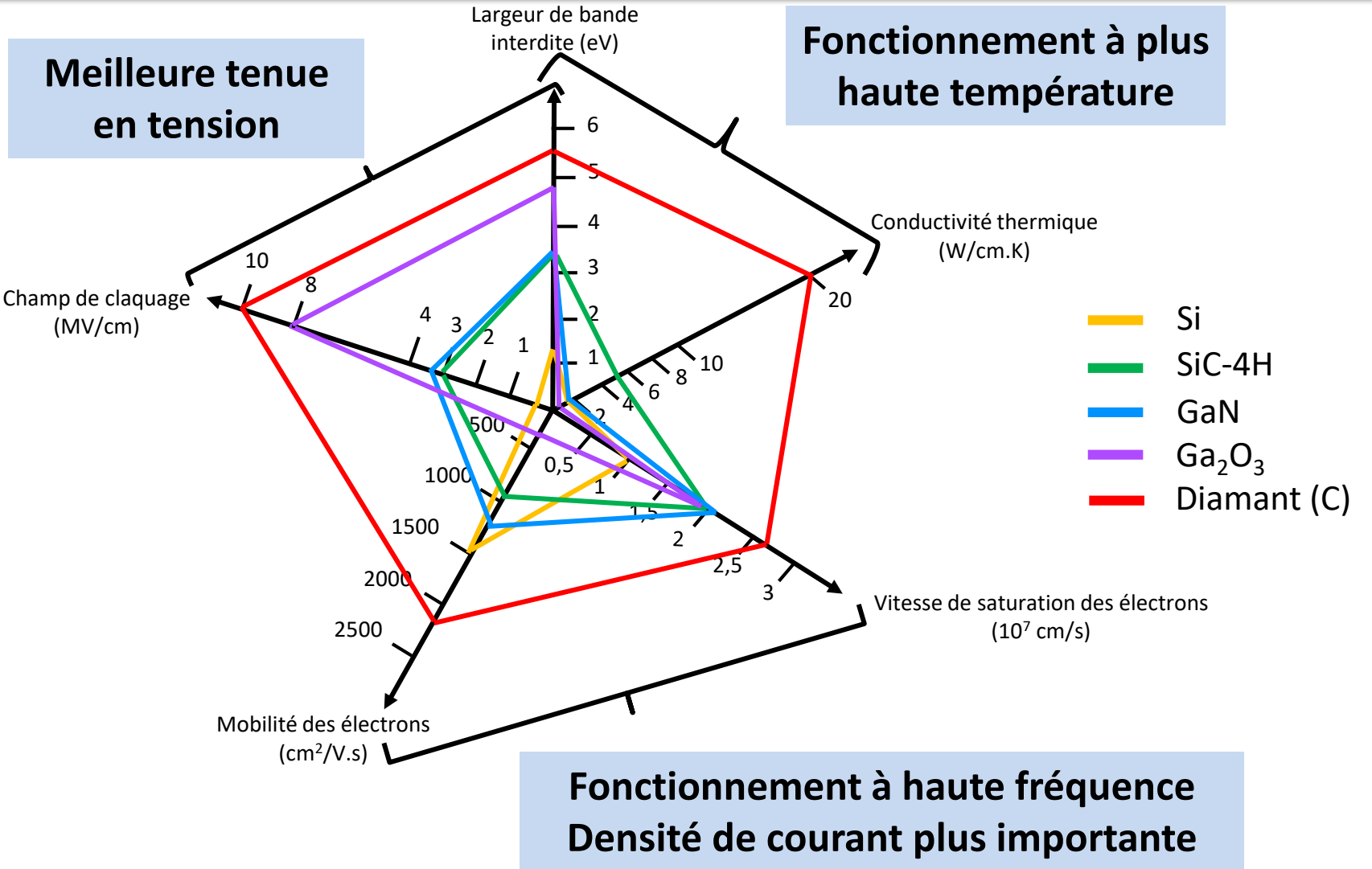
- Diamond
- SiC
- GaN
- $Al_{0.6}Ga_{0.4}N$
- $\beta-Ga_2O_3$



Les WBG (Wide Band Gap) pour la puissance

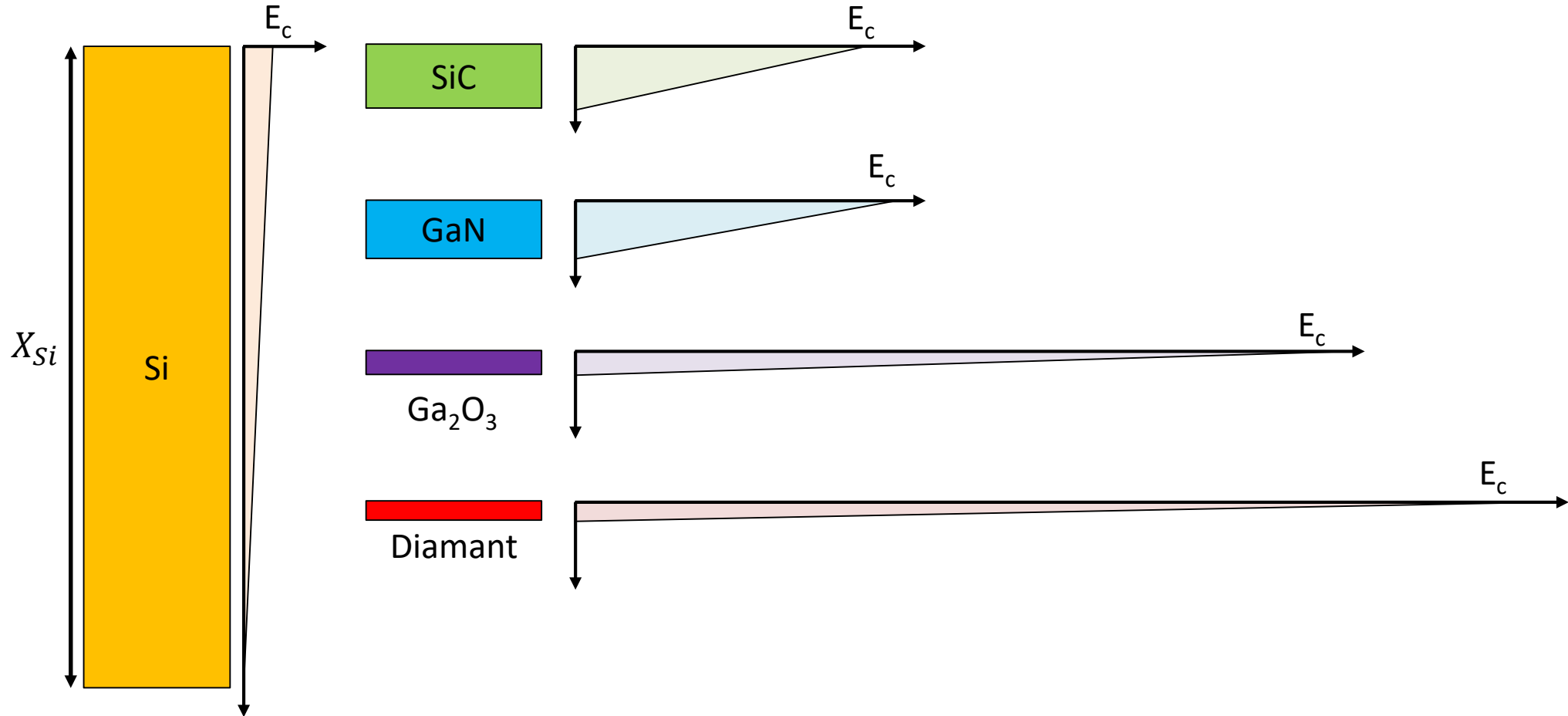
	Si	4H-SiC	GaN	Diamant	Ga ₂ O ₃
Largeur de bande interdite E_G (eV)	1,12	3,3	3,39	5,47	4,85
Concentration intrinsèque des porteurs n_i (cm ⁻³) à 300 K	$1,5 \times 10^{10}$	$8,3 \times 10^{-9}$	$1,6 \times 10^{-10}$	$1,6 \times 10^{-27}$	$1,5 \times 10^{-10}$
Champ électrique critique de claquage E_C (MV.cm ⁻¹)	0,3	3	3,3	10	8
Mobilité des électrons μ_n (cm ² .V ⁻¹ .s ⁻¹) pour un dopage de 10^{15} at.cm ⁻³	1500	980	1250	2200	300
Mobilité des trous μ_p (cm ² .V ⁻¹ .s ⁻¹) pour un dopage de 10^{15} at.cm ⁻³	450	120	35	2050	
Conductivité thermique λ (W.cm ⁻¹ .K ⁻¹)	1,3	5	1,3	20	0,1-0,3
Permittivité relative ϵ_r	11,8	9,7	10,4	5,7	10
Vitesse de saturation des électrons v_s (x10 ⁷ cm.s ⁻¹)	1	2	2,2	2,7	1,8-2
Vitesse de saturation des trous v_s (x10 ⁷ cm.s ⁻¹)	1	0,3	0,5	1,1	
Durée de vie des porteurs $\tau_{n,p}$ (s)	$10^{-8} - 10^{-3}$	$10^{-9} - 10^{-6}$		$10^{-10} - 10^{-7}$	
Température maximum d'utilisation T_{max} (°C) évaluée à partir de la température maximale de jonction	125	500	650	700	

Les WBG (Wide Band Gap) pour la puissance

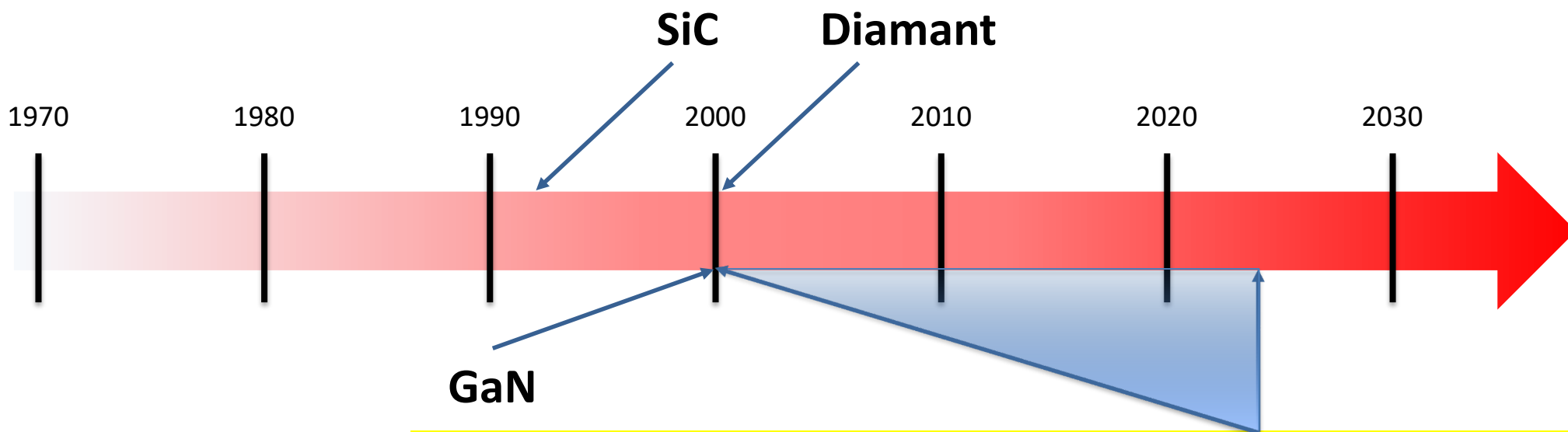


Tenue en tension : WBG vs Si

$$BV = 1 \text{ kV} \quad - \quad X_N = \frac{2 \cdot BV}{E_c}$$



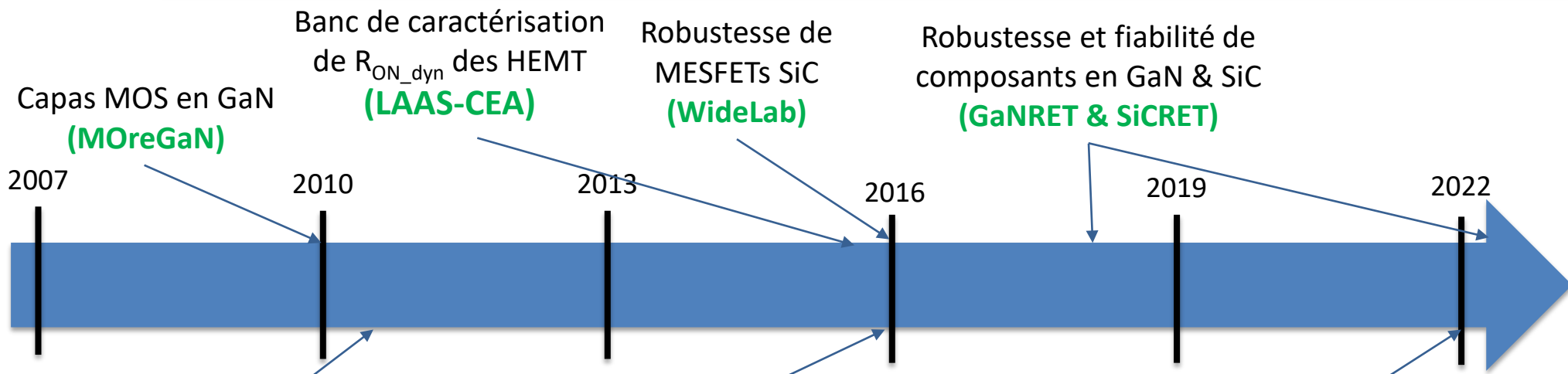
Composants de puissance : un peu d'histoire...



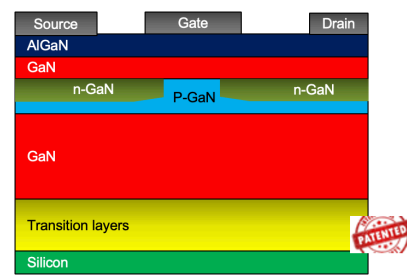
Au LAAS : équipe ISGE (« Intégration des Systèmes de Gestion de l'Énergie ») :

- Travaux sur les composants et l'intégration de fonctions de puissance Si
- Travaux sur les composants WBG : diamant, GaN & SiC

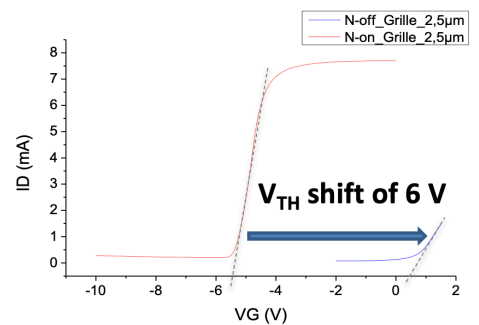
Composants de puissance en GaN & SiC



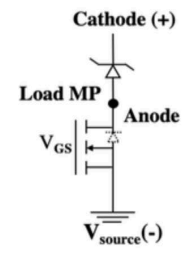
Premier GaN HEMT sur substrat Si 6'' (ToPoGaN)



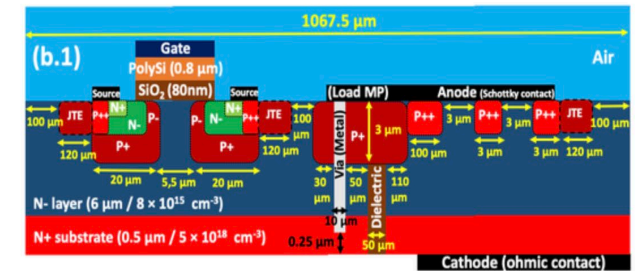
Premier GaN HEMT normally-off (Maturation TTT)



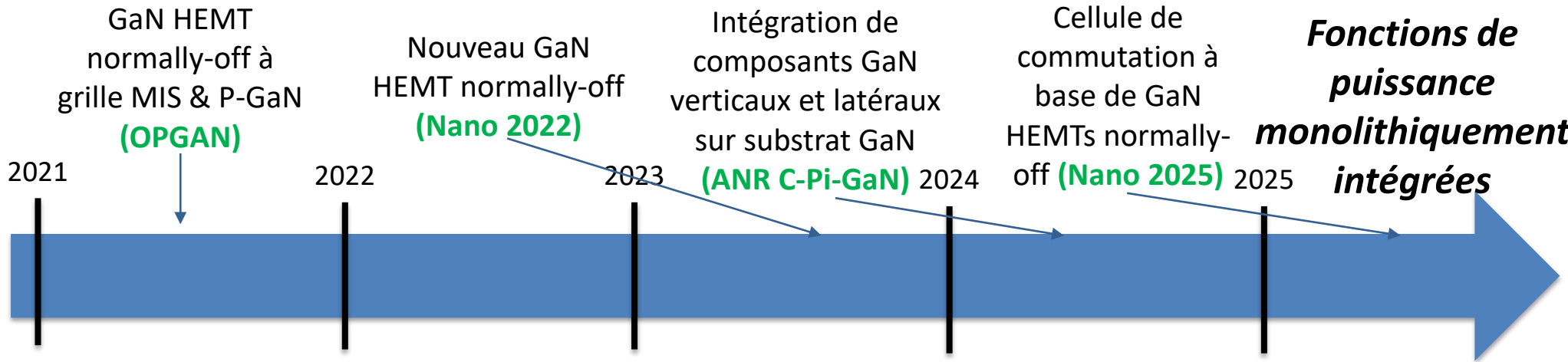
Experimental transfer characteristics



Intégration monolithique de cellules de commutation SiC (MUS²-IC)

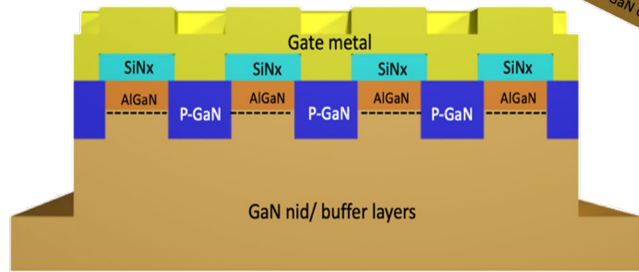
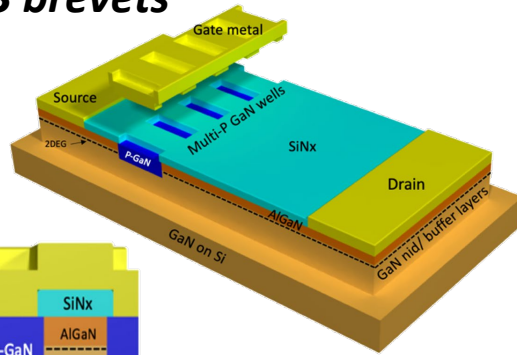


Composants de puissance en GaN

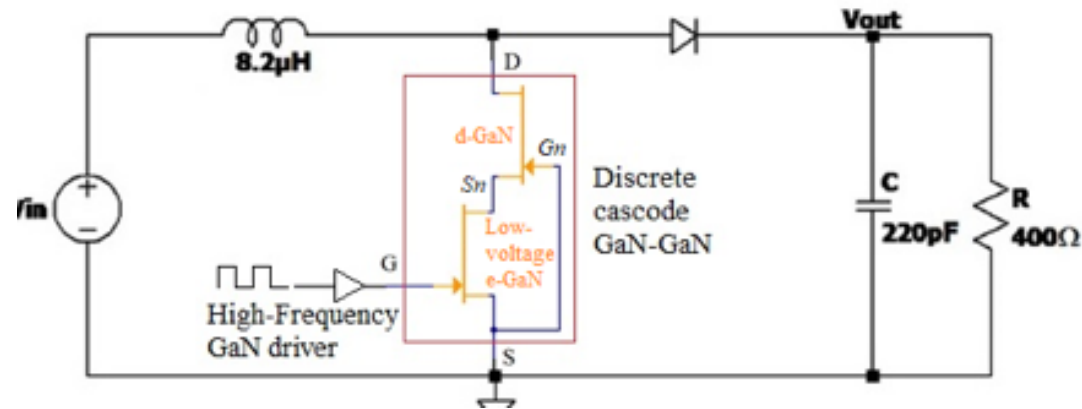


Nouvelles architectures HEMT normally-off :

3 brevets



Conception originale de convertisseur HF
Utilisation du savoir-faire sur les ESD



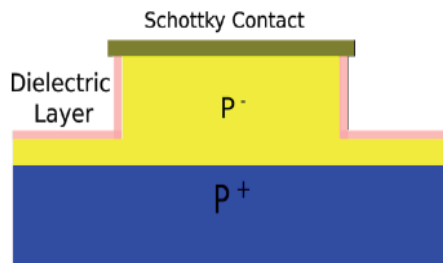
Composants de puissance en Diamant

Conception, réalisation et caractérisation de composants (diodes PiN, diodes TMBS, U-MOSFETs, etc.) très haute tension et haute température

- Conception d'architectures de composants
- Développement de briques technologiques spécifiques
 - Croissance des couches de diamant N et P sur substrat de grande taille
 - Contacts ohmiques sur diamant de types N et P
 - Interface 'diamant/diélectrique' (choix du diélectrique crucial)
 - Gravure

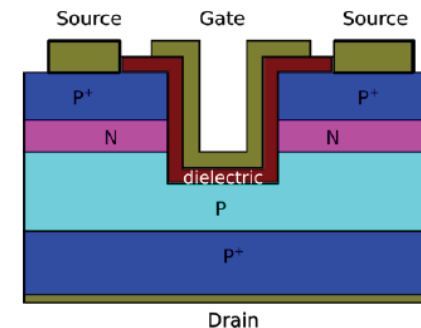
Diam-pTMBS (MOveToDiam)

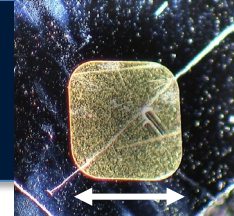
- $J_D \geq 1500 \text{ A/cm}^2$
- $BV \geq 6 \text{ kV}$
- Fonctionnant à 300°C



Diam-UMOSFET (MOveToDiam)

- $R_{ON} < 75 \text{ m}\Omega$
- $600 \text{ V} \leq BV \leq 1200\text{V}$
- Fonctionnant à 300°C





Diodes verticales réalisées sur un empilement $N^+/N^-/P^+$

200 μm

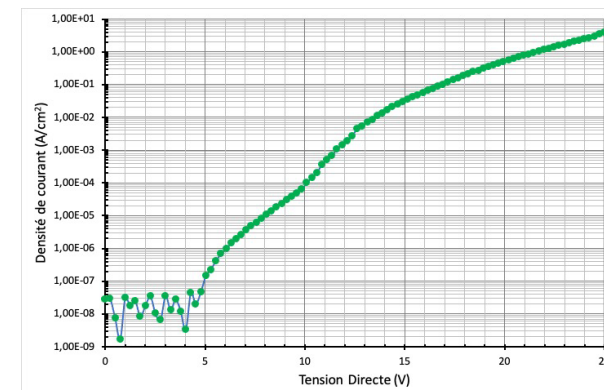
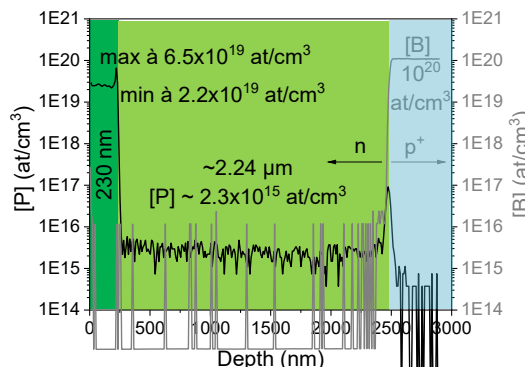
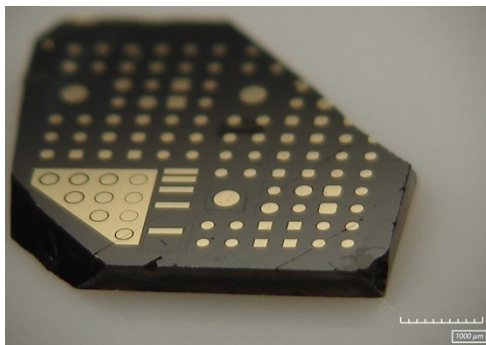
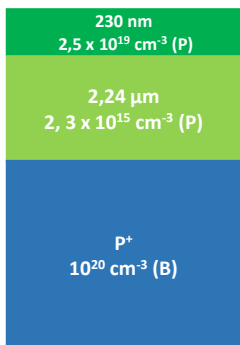
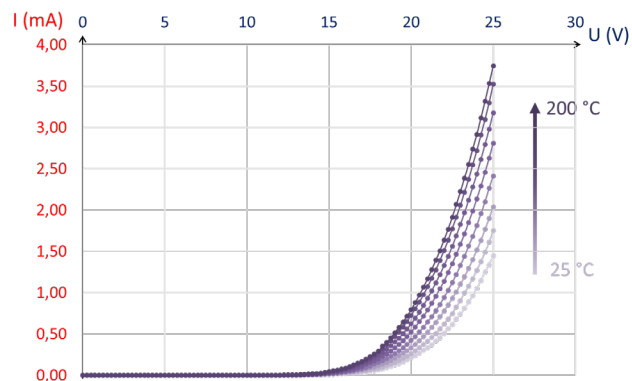


Schéma de l'empilement $N^+/N^-/P^+$

Photos des diodes fabriquées en salle blanche du LAAS

Profil de dopage de l'empilement obtenu par analyse SIMS

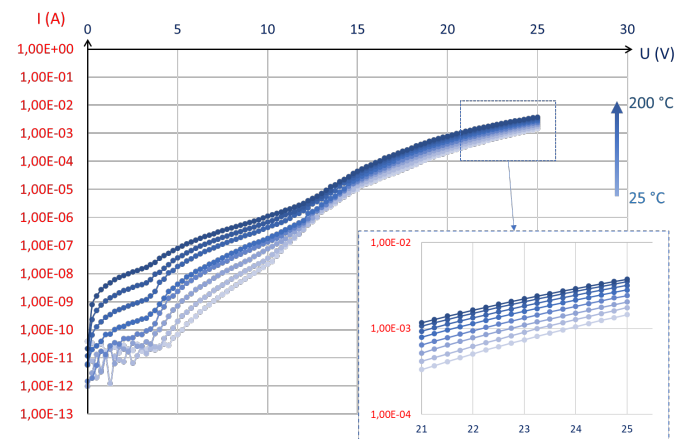
Densité de courant vs tension en direct d'une diode carrée ($S = 4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$)



Augmentation du courant avec la température :

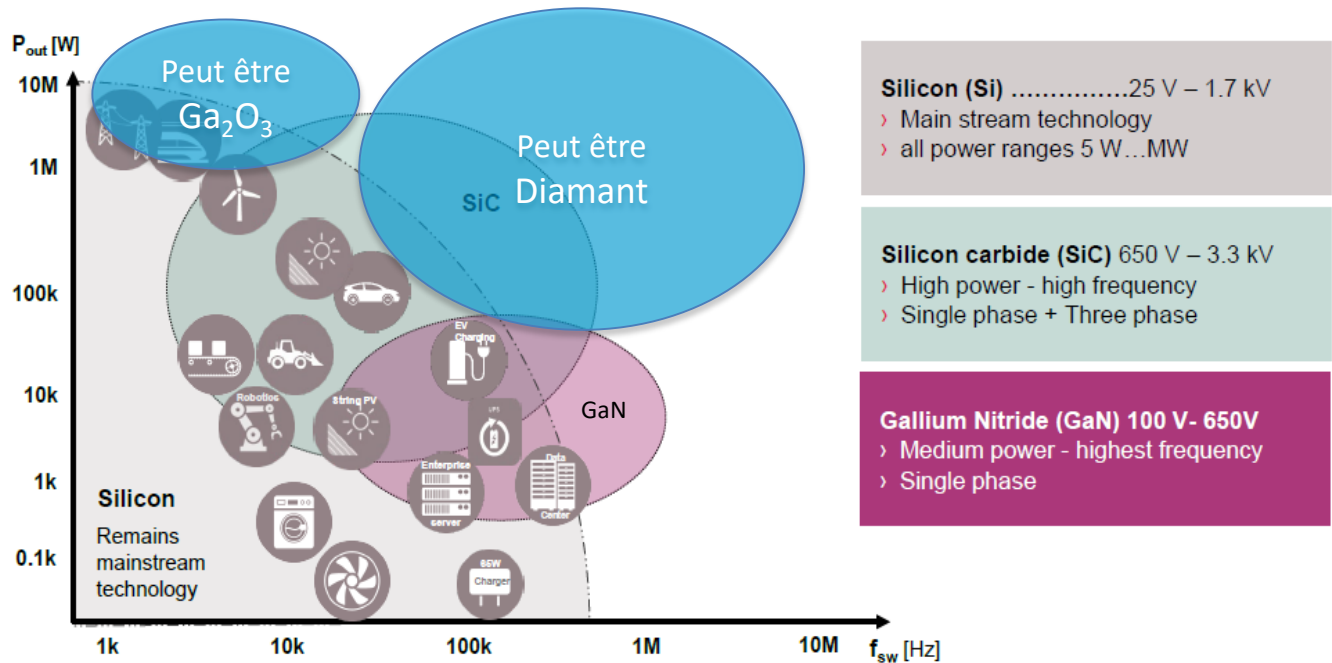
$I = 1,5 \text{ mA @ } 25 \text{ °C @ } 25 \text{ V}$
 $I = 3,7 \text{ mA @ } 200 \text{ °C @ } 25 \text{ V}$

Direct current in a 200 μm square diode @ different temperature

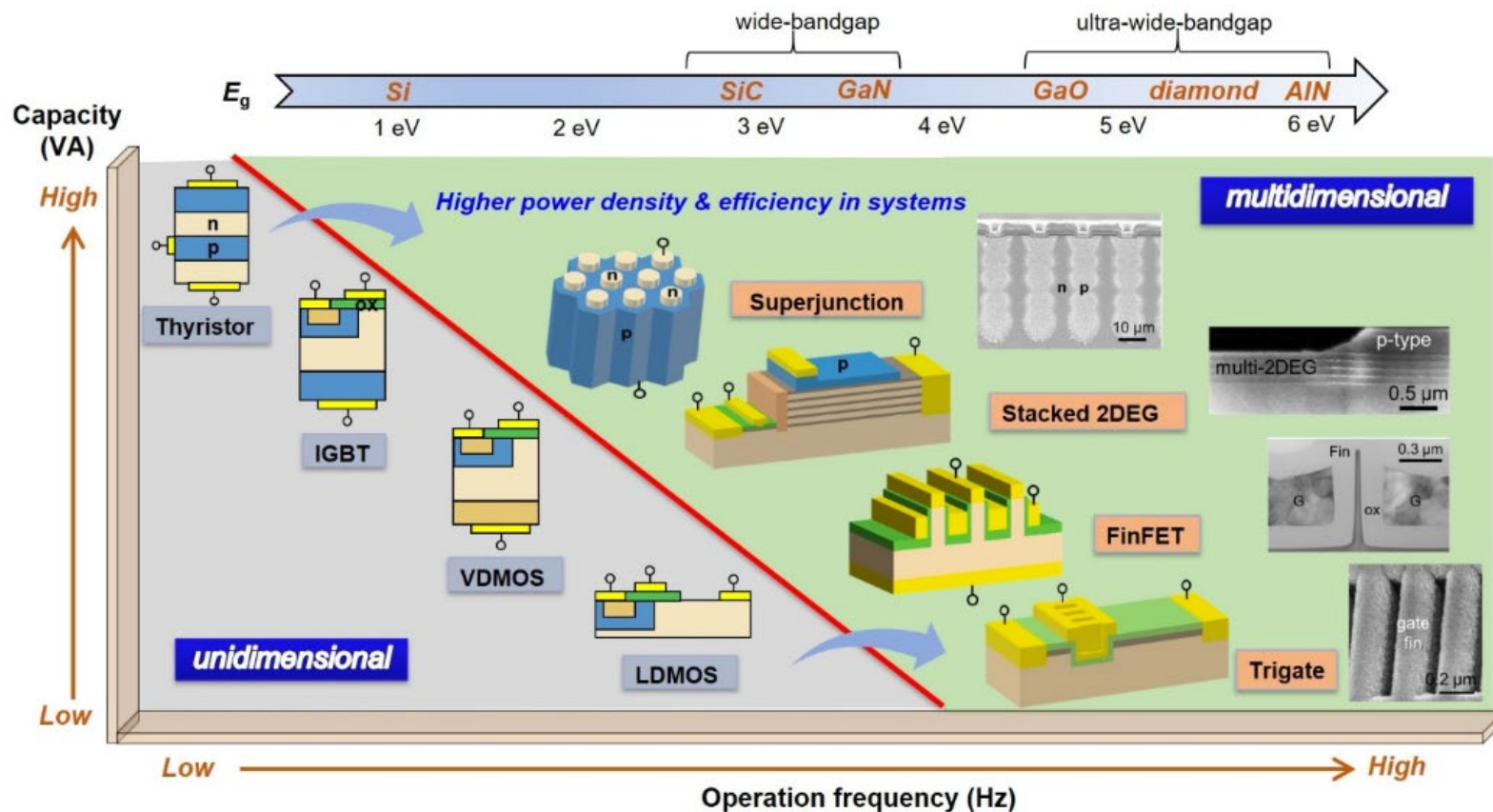


Compromis 'puissance / fréquence'

Si, SiC and GaN

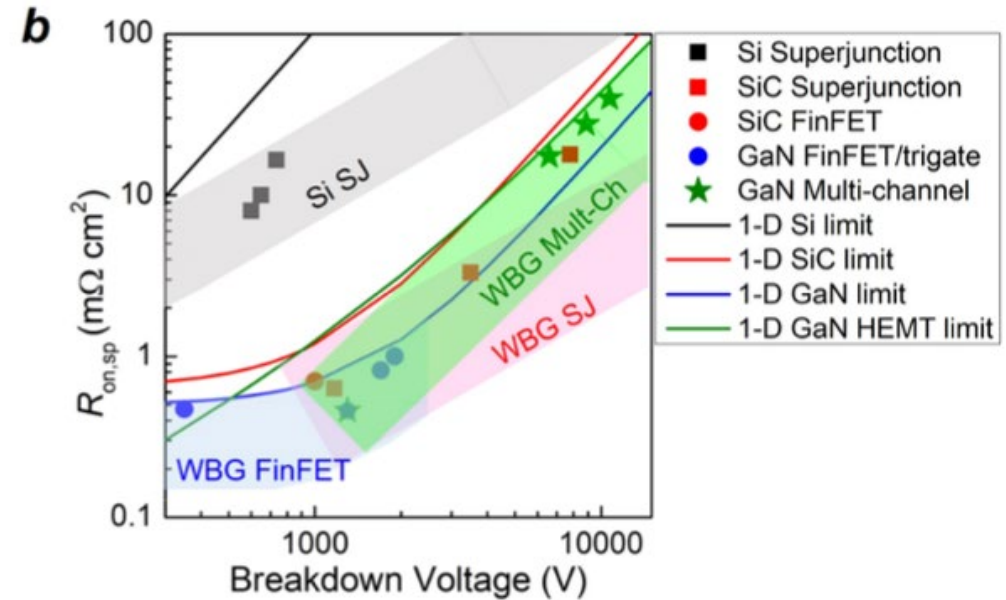
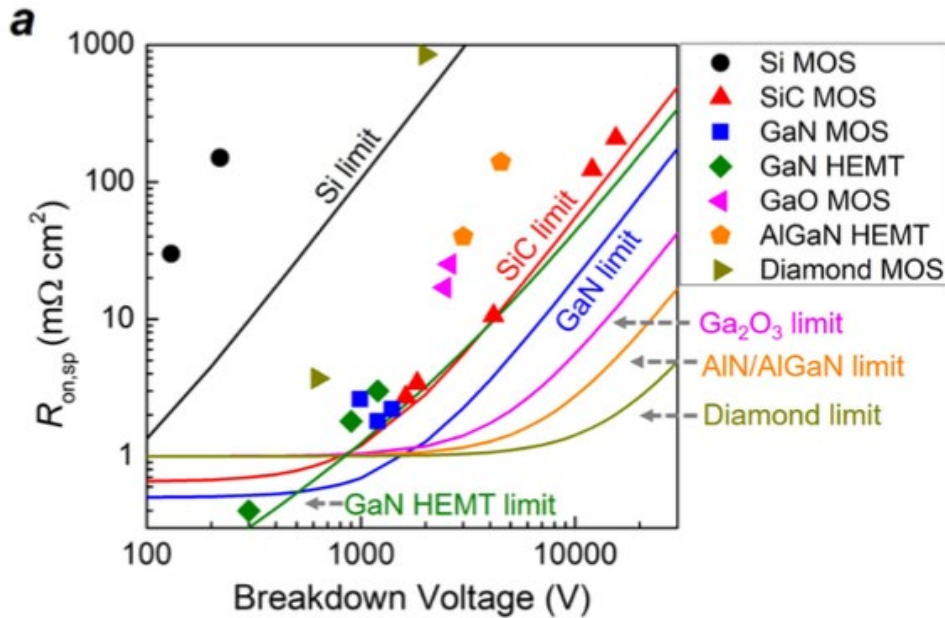


Vers les composants multidimensionnels WBG ?



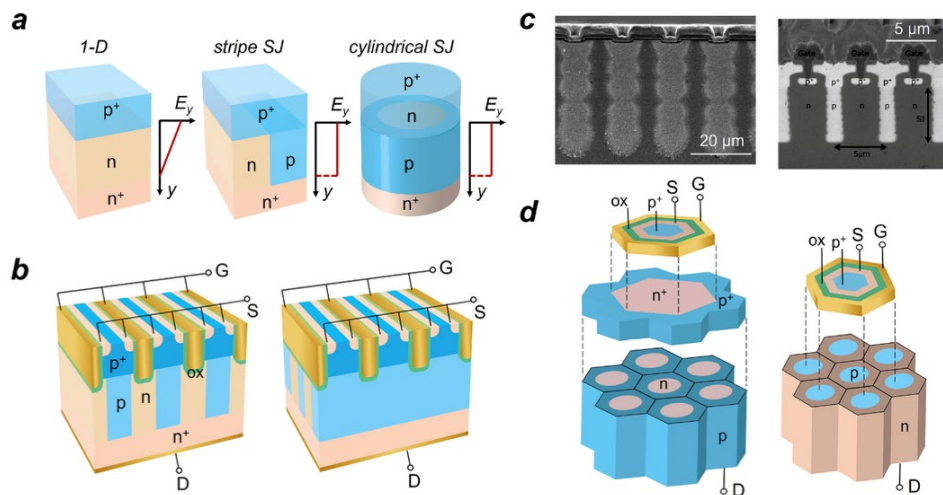
Compromis 'puissance / fréquence' pour les composants de puissance « unidimensionnels » et « multidimensionnels » & bénéfices potentiels apportés par les WBG

Zhang, Udrea & Wang, Nature Electronics volume 5, pages 723–734 (2022)

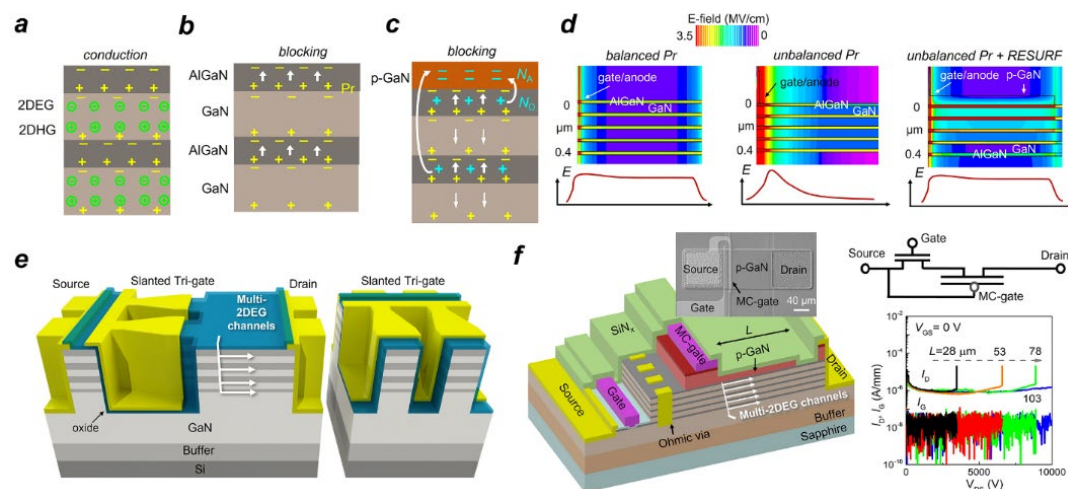


Compromis ' $R_{ON} \cdot S / BV$ ' pour les composants de puissance « unidimensionnels » et « multidimensionnels » & bénéfices potentiels apportés par les WBG

Zhang, Udrea & Wang, *Nature Electronics* volume 5, pages 723–734 (2022)



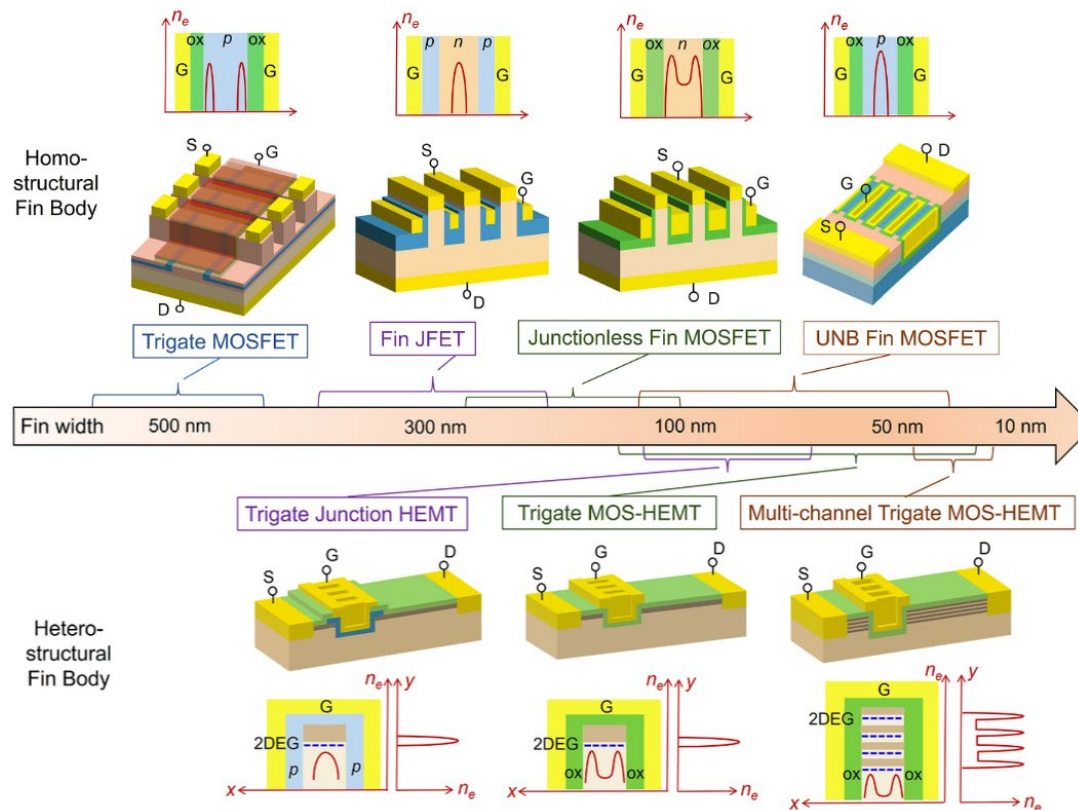
Composants de puissance à Superjonction



Hétérostructures de puissance multicanaux

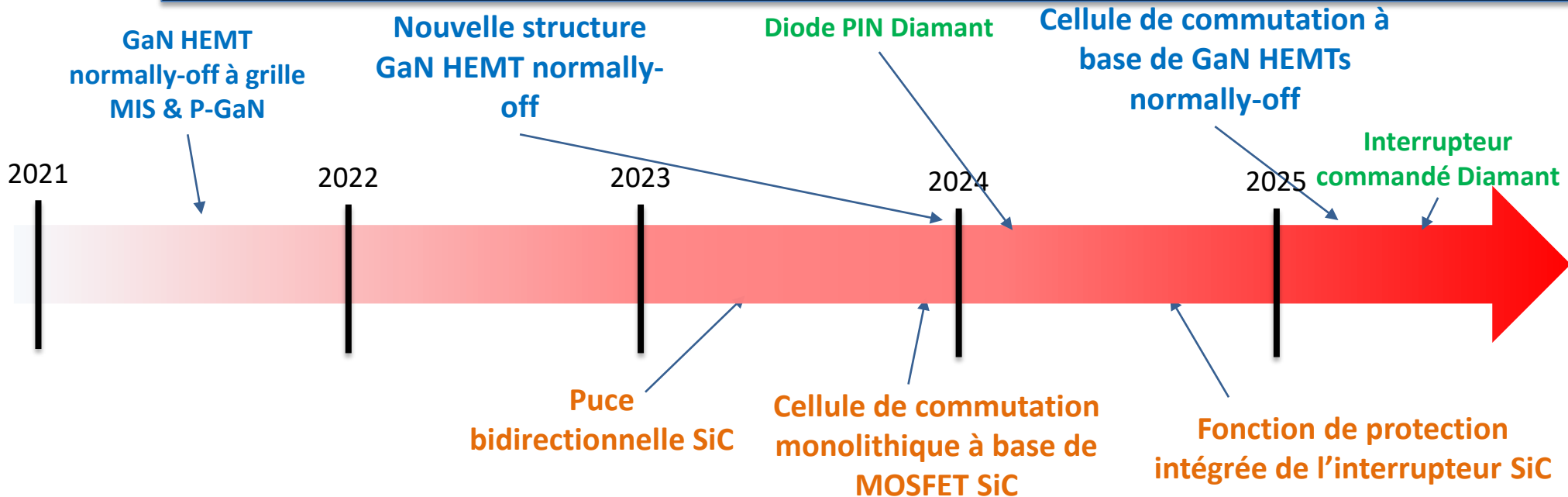
Zhang, Udrea & Wang, *Nature Electronics* volume 5, pages 723–734 (2022)

Vers les composants multidimensionnels WBG ?



Composants de puissance FinFETs et HEMTs trigate

Zhang, Udrea & Wang, *Nature Electronics* volume 5, pages 723–734 (2022)



○ Composants :

- GaN HEMT normally-off
- Vertical GaN MOSFET (VERTIGO – France 2030)
- JFET & MOSFET diamant (FrenchDiam – France 2030)

○ Intégration de fonctions de puissance WBG

- Interrupteurs 3 électrodes auto-protégés contre les régimes extrêmes
- Bidirectionnalité

○ Vers des cellules de commutation monolithiques

- GaN (Nano 2025 – IPCEI)
- SiC (MUS²-IC)
- Diamant (FrenchDiam – France 2030)

○ Nouveaux matériaux ?

- Ga₂O₃, AlN, BN ?

○ Nouvelle approche : intégration multi-matériaux