

窒化物半導体の特徴とデバイス展開

橋詰 保

北海道大学

量子集積エレクトロニクス研究センター

hashi@rciqe.hokudai.ac.jp

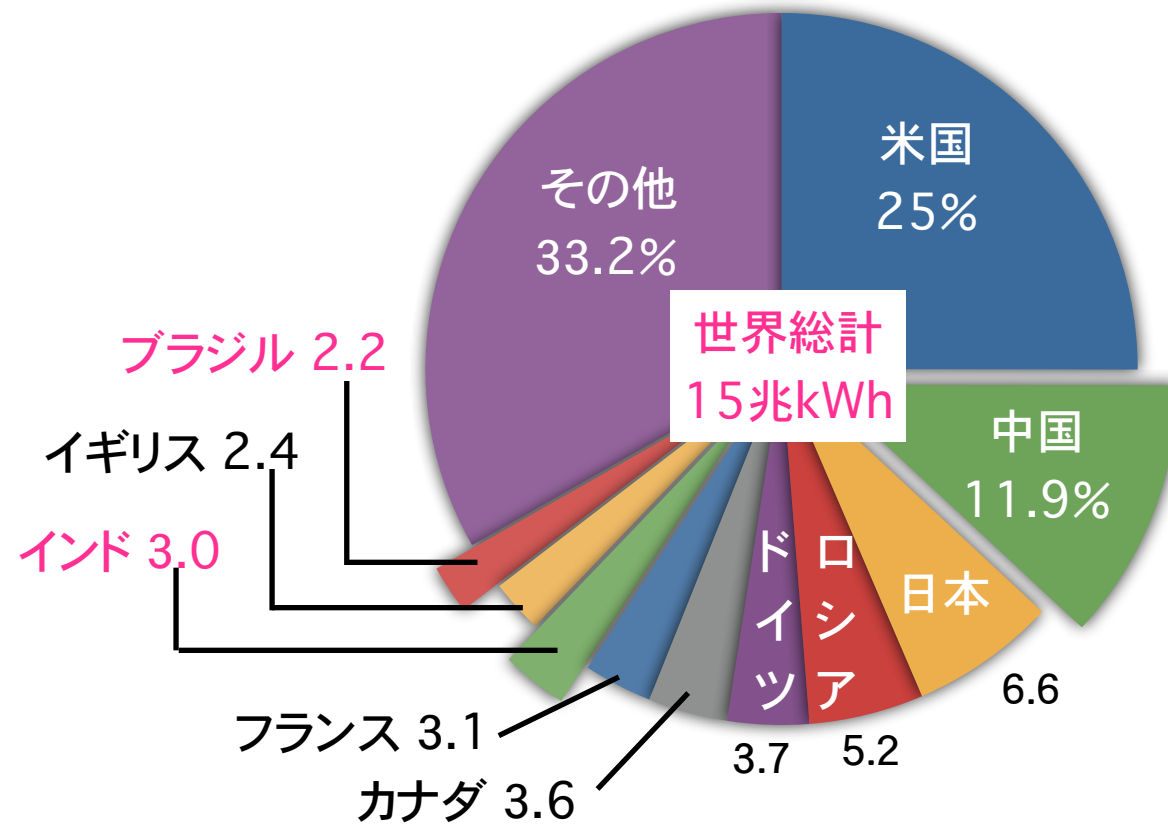
[http:// www.rciqe.hokudai.ac.jp](http://www.rciqe.hokudai.ac.jp),

<http://www.ist.hokudai.ac.jp>

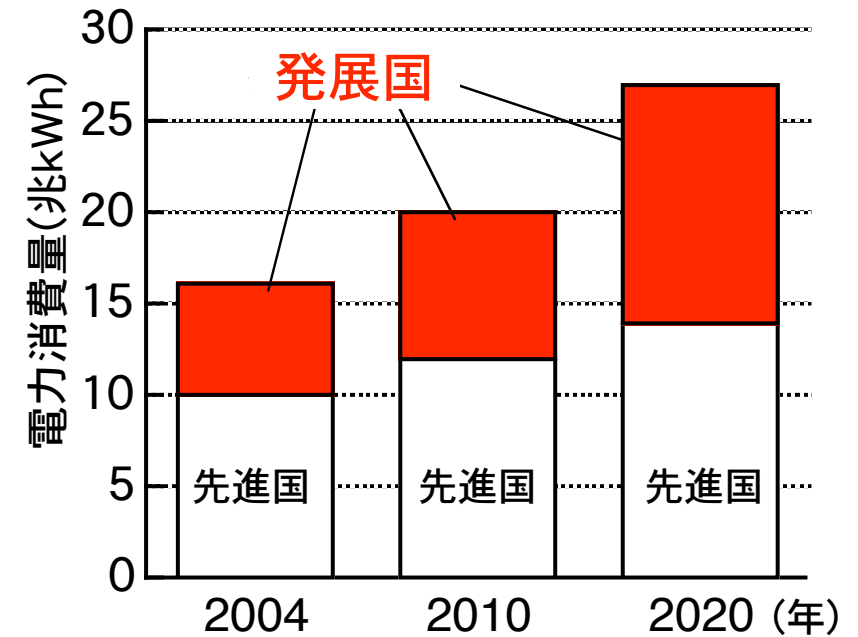
- 内容
- 1) エネルギー消費の現状
 - 2) インバーターの重要性と限界
 - 3) ワイドギャップ半導体の特徴とインバータ応用
 - 4) GaN系トランジスタの現状
 - 5) 光デバイス、センサー応用

世界の電気エネルギー消費の推移と予測

現状

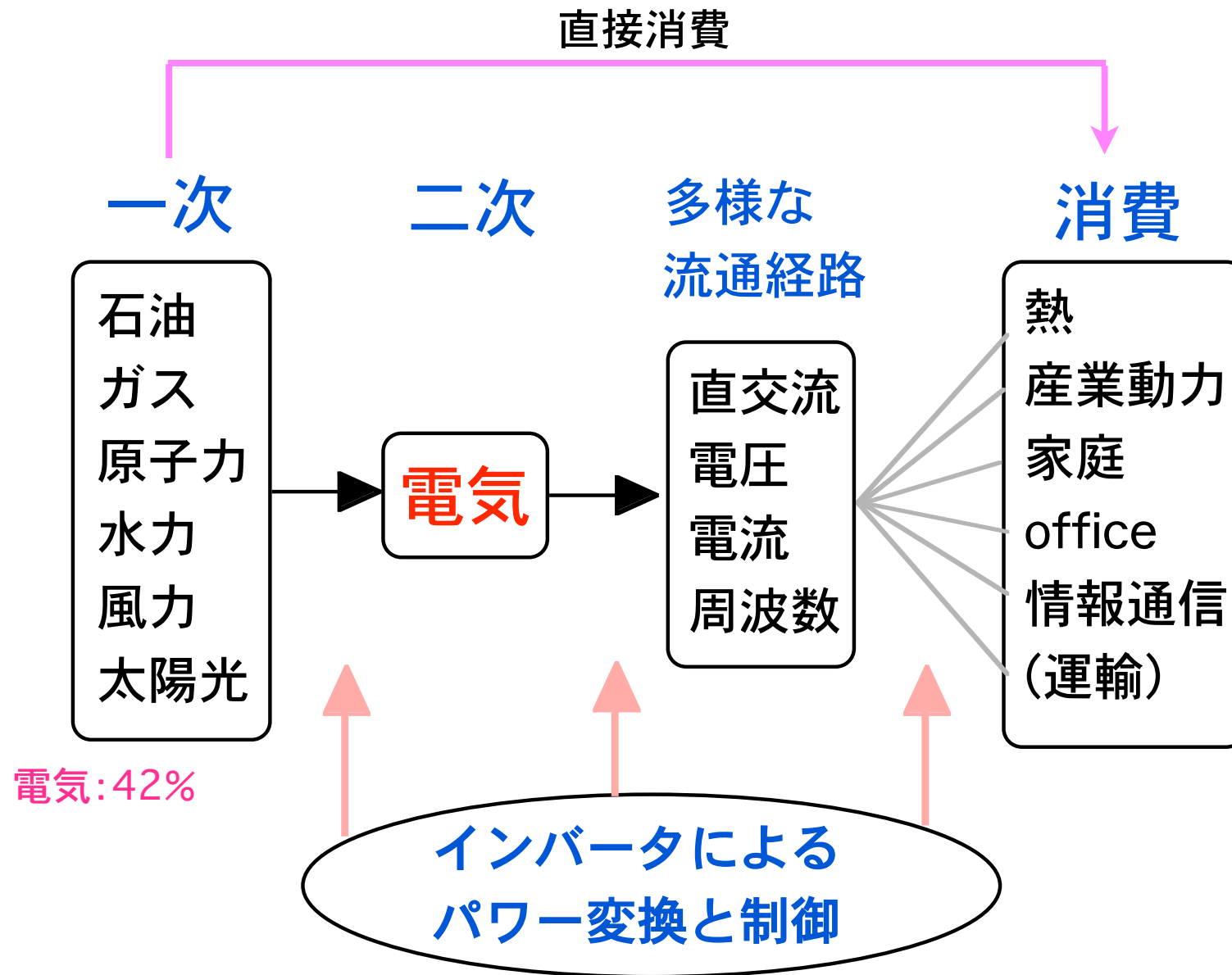


予測



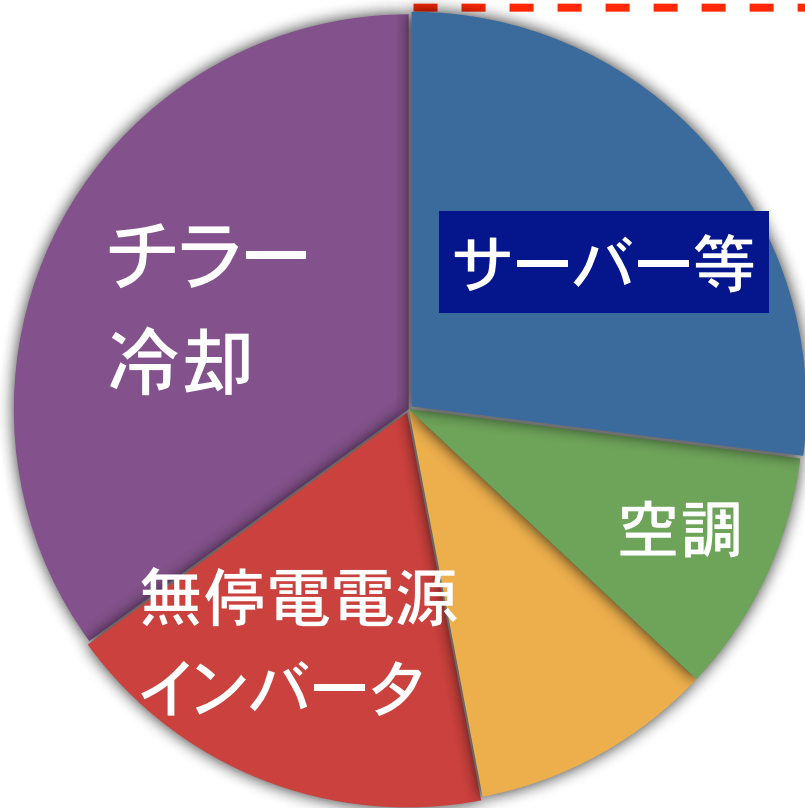
2006年電気事業連合会資料

発電から消費までの電力の流れ

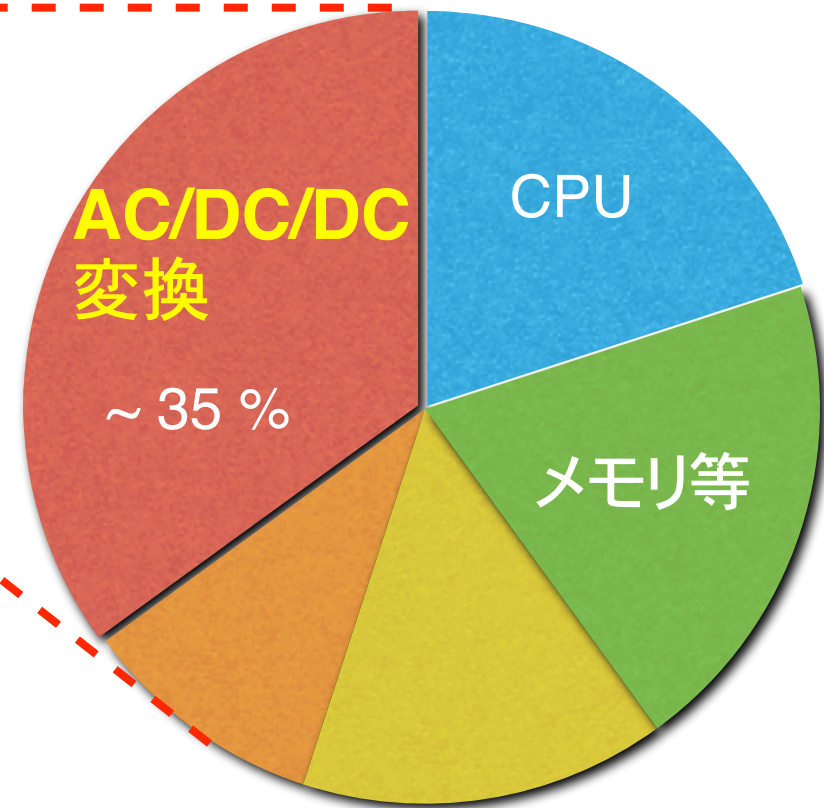


高密度集中型情報通信の電力消費

データセンター電力



サーバー電力



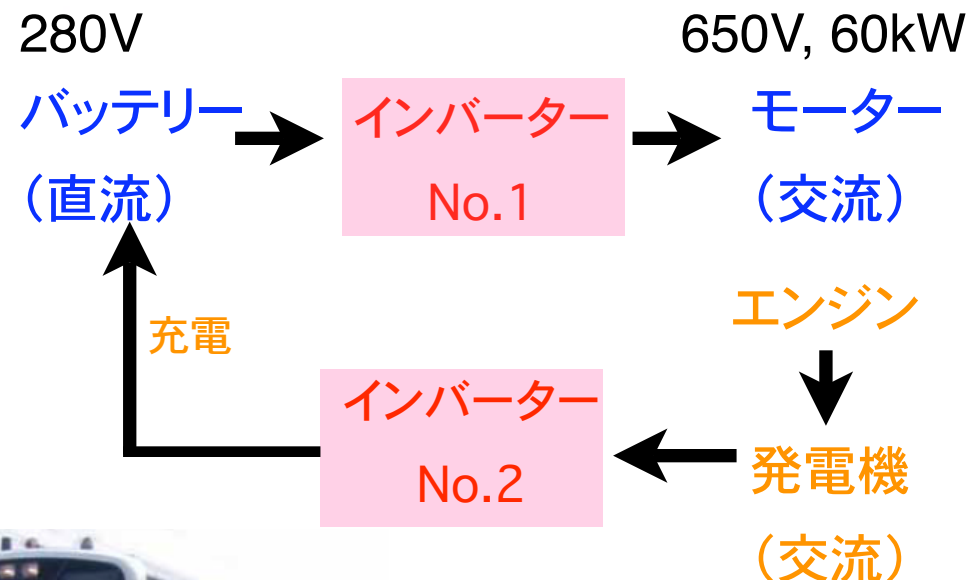
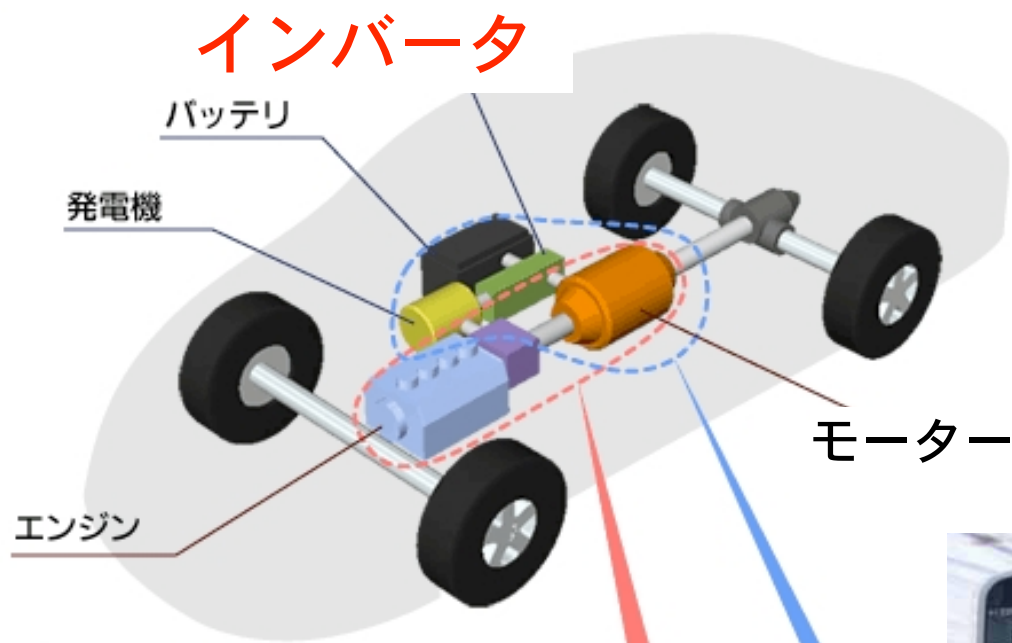
現在は総電力消費の5%



2025年には50%以上

ハイブリッドシステム

ハイブリッド自動車の構造

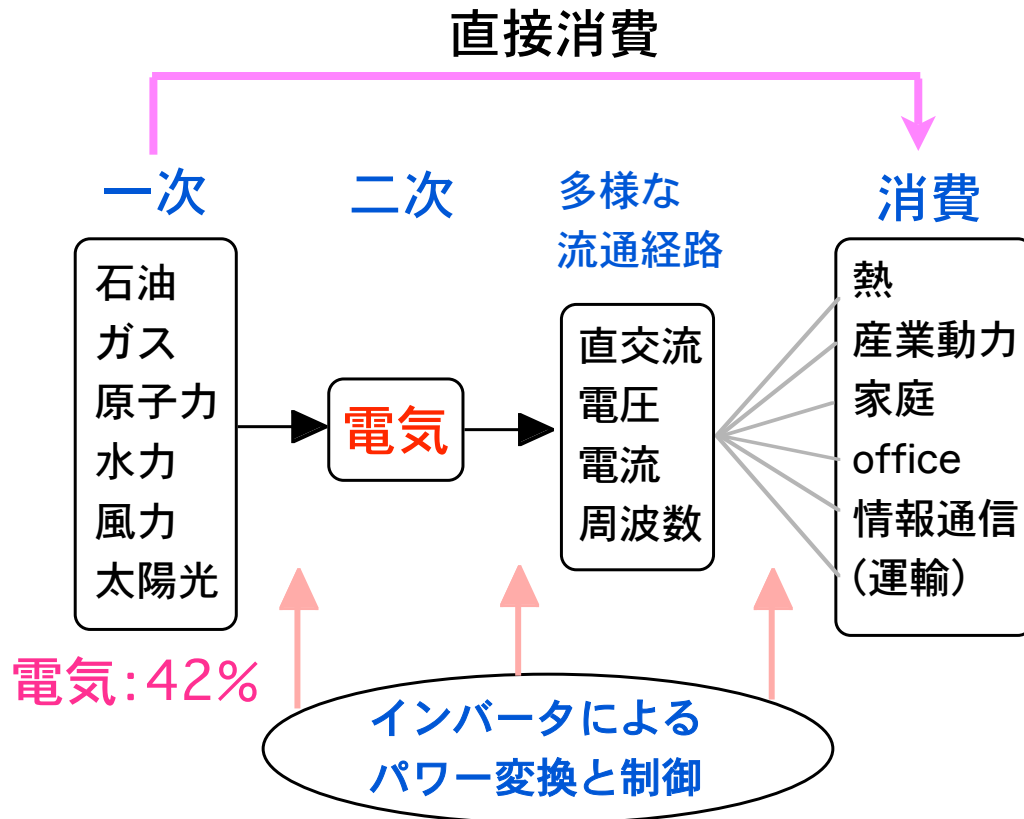


ハイブリッドディーゼル列車
2007年7月31日～
長野県-小海線(小淵沢-小諸)



全出力: 330kW(450PS)
モーター: 95kW
NO_x: 60%低減
粒子排出: 60%低減
燃料消費10-20%低減

省エネルギーにおけるインバータの重要性



インバータ革新は省エネルギーのキーテクノロジー

しかし...

現行のインバータ効率

家電製品用～90%
情報機器～90%
集中型データセンター～80%
ハイブリッド車～80%

損失が10-20%も!!

例:ハイブリッド車用60kW
で損失は6kW—熱発生

Siの材料限界

新しいインバータ用半導体-GaNとSiC-

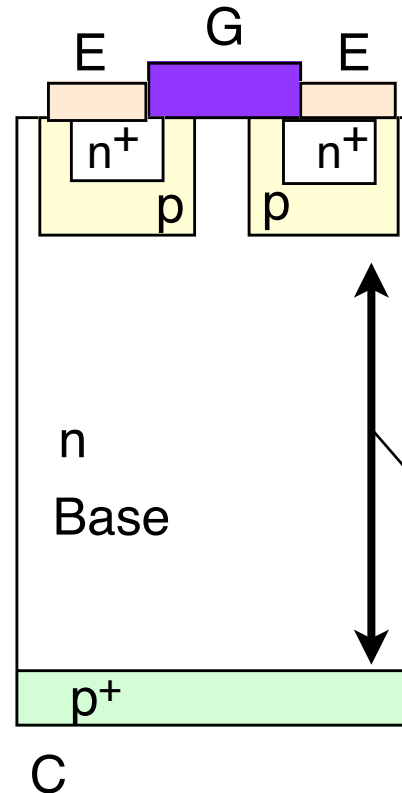
	室温のバンドギャップ	破壊電界 (V/ μm)
Si	1.1 eV	30
SiC	3.3 eV	300
GaN	3.4 eV	300
AlN	6.0 eV	400

Siの3倍以上

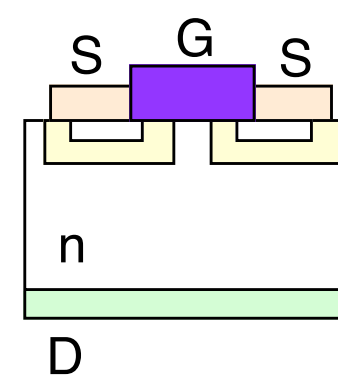
Si動作補償温度 150°C
 GaN/SiCの動作温度
 実用上: 500°C

Siの10倍

Si IGBT



SiC or GaN FET



300 V/ μm

膜厚1/10

電子密度100倍

動作抵抗1/100以下

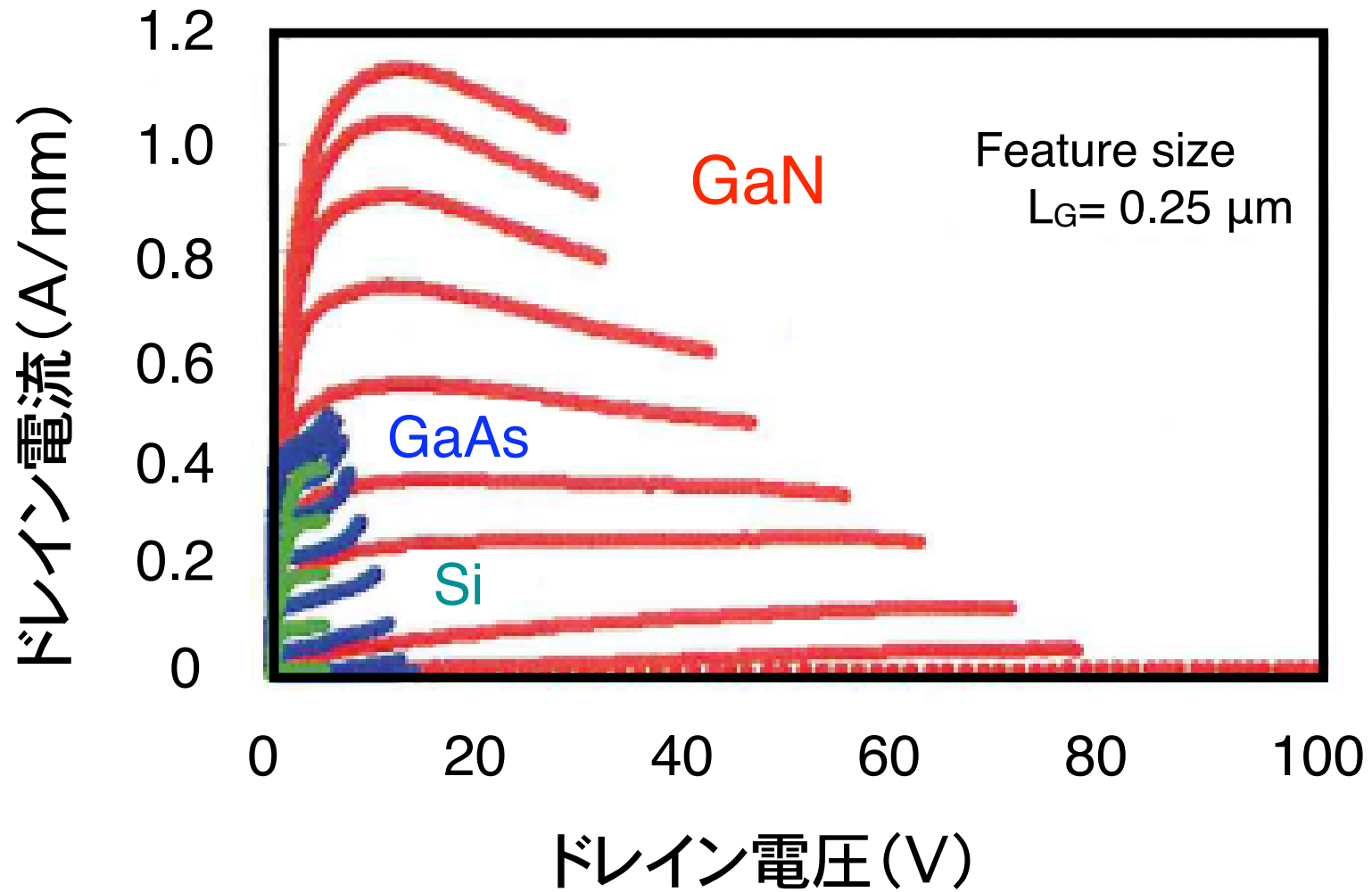
30 V/ μm

1000V動作で
 100 μm 以上

低損失で高温環境に強いインバータ

冷却系の簡略化・空冷

トランジスタ出力の比較



電力素子としての性能指数

	Johnson JFM	Baliga BFM
Si	1	1
GaAs	7	15
4H-SiC	600	400
GaN	600	400
Diamond	1100	1400

$$R_{on} = \frac{V_B^2}{\epsilon \mu E_{\max}^3}$$

Baliga性能指数
電力変換

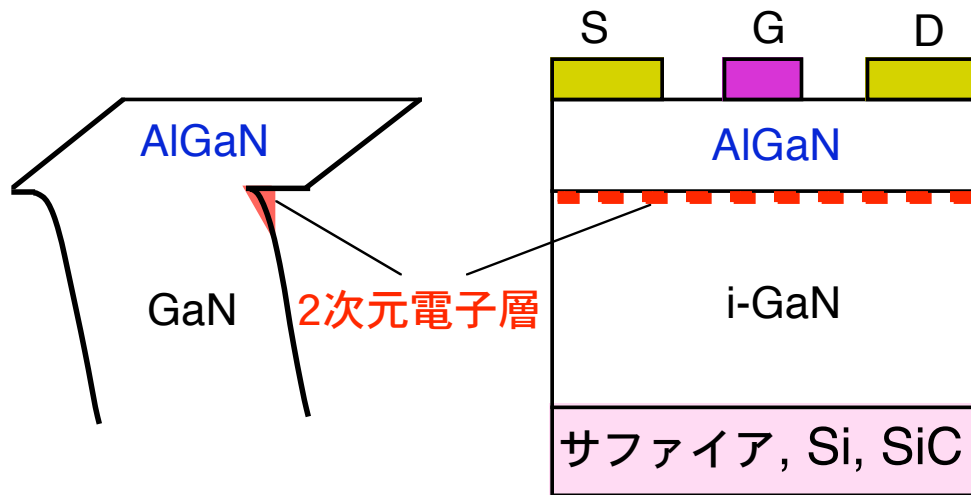
$$V_m f_T = \frac{E_B v_s}{2\pi}$$

$$P \sim \underline{(v_s E_B)^2}$$

Johnson性能指数
高周波パワー

横型トランジスタ(HEMT)の利用

異種基板へテロ構造の2次元電子層



	キャリア密度 (cm^{-2})	チャネル移動度 (cm^2/Vs)
SiC MOSFET	1×10^{12}	100-500
GaN HEMT	1×10^{13}	2000

$$\rho = \frac{1}{qn\mu}$$

動作抵抗を極めて低くできる
高い動作周波数

HEMT: High Electron Mobility Transistor

GaN系デバイスで最も研究が進展している
光デバイス、高周波素子が製品化
エピタキシャル成長技術の進展



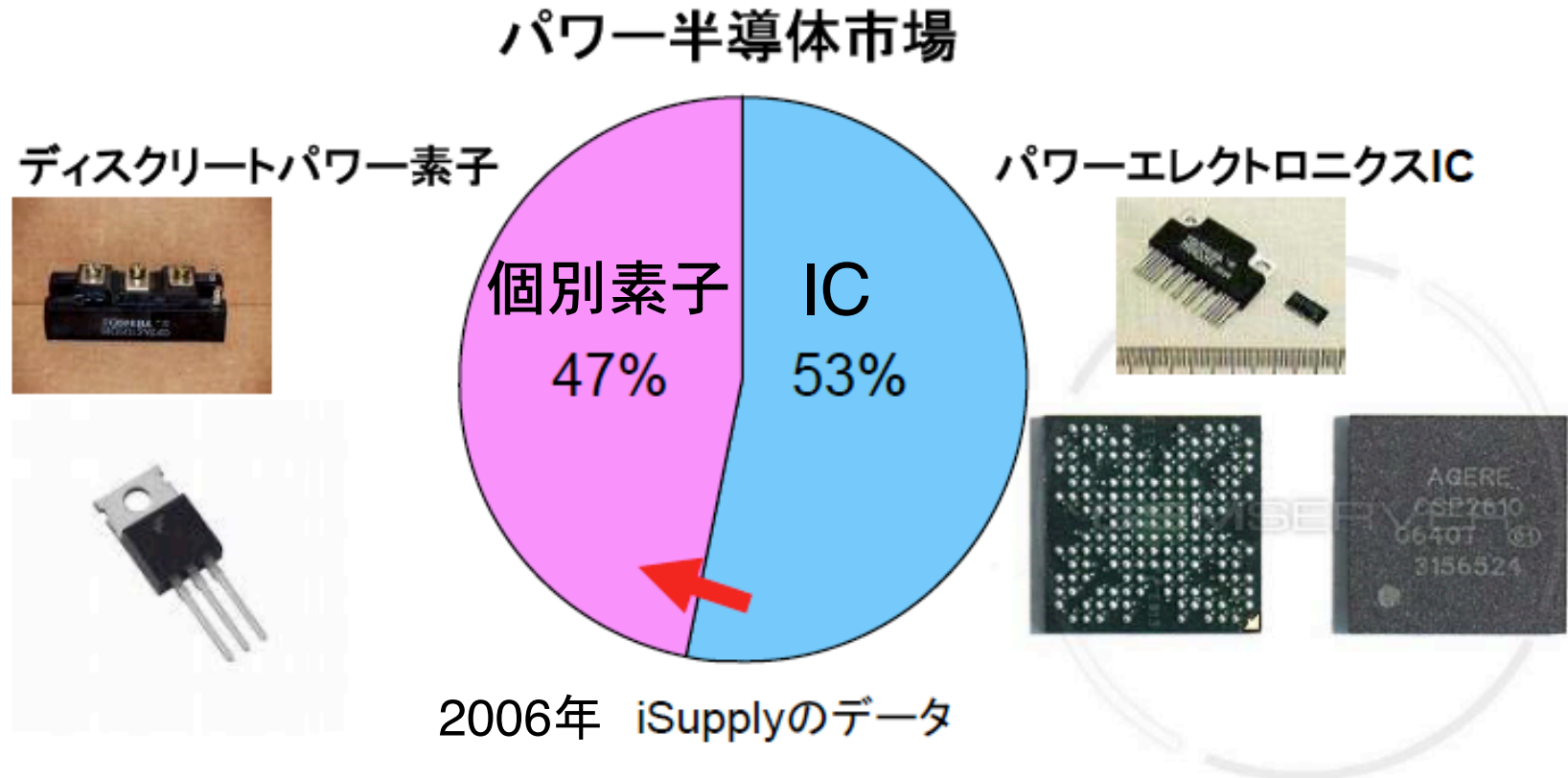
- ・集積化が容易
- ・高周波スイッチングが得意
- ・低雑音



横型素子の特徴を生かしてSiインバータの
ライバルを早い時期に世に送り出す

基板がない → 基板を選ばない

パワーデバイスのIC化動向



IC化の流れ

量産効果、汎用性、利便性

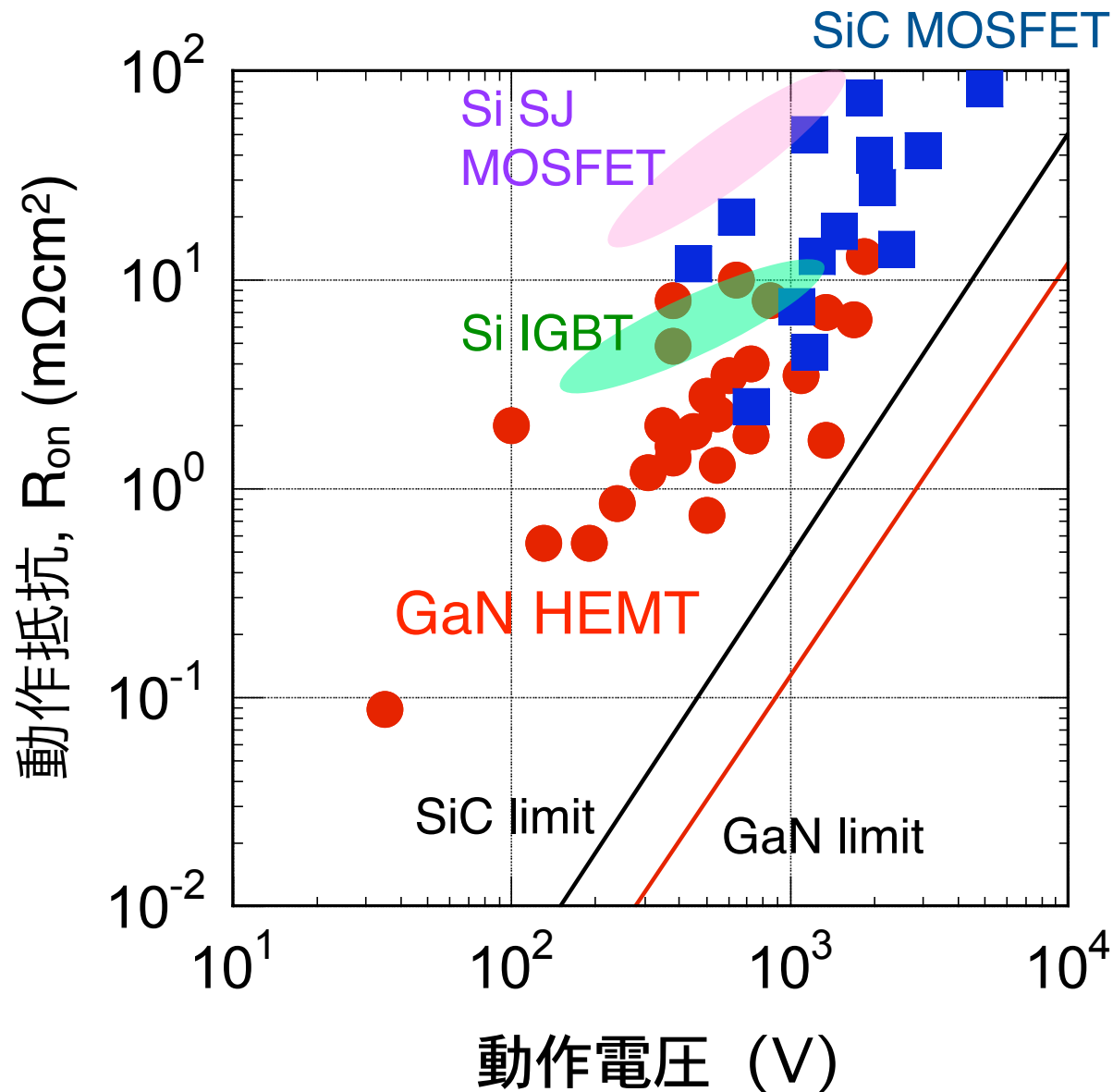
横型素子は集積化に有利

GaNにより数kW-10kWクラス(家電、情報)のICが可能

Siでは0.2kWが限界

耐圧と損失発熱

Si, SiC, GaNトランジスタの動作損失



現行のインバータ効率

家電製品用～90%

情報機器～90%

集中型データセンター～80%

ハイブリッド車～80%



インバータ効率は95%以上

冷却系の簡略化も含めると

2030年のCO₂換算

1～2億t(現在の10-15%)

世界の研究開発動向



日本

パナソニック、東芝、三菱、NEC、ローム、シャープ、
富士通、サンケン電気、・・・トヨタ、・・・

次世代パワーデバイス技術研究組合：富士電機 + 古河電工

米国

Cree、International Rectifier、Velox Semiconductor、・・・

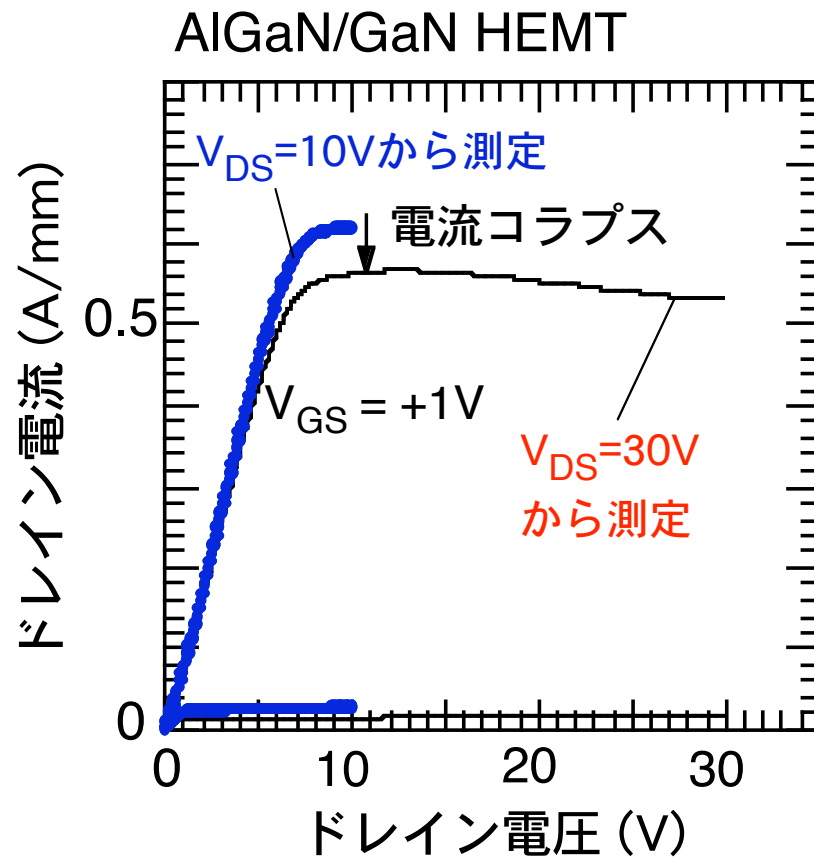
DARPAプロジェクト (Defense Advanced Research Projects Agency)

EU

ドイツ、フランス、ベルギー、スペインを中心とする
各国の研究機関

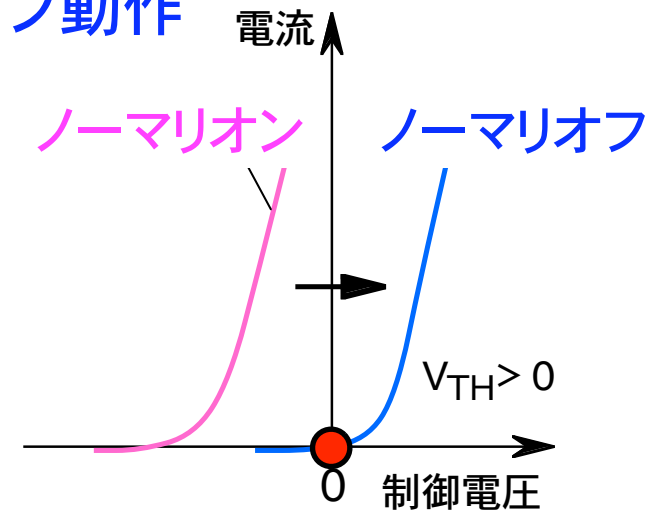
GaNトランジスタのインバーター応用への課題点

動作安定性

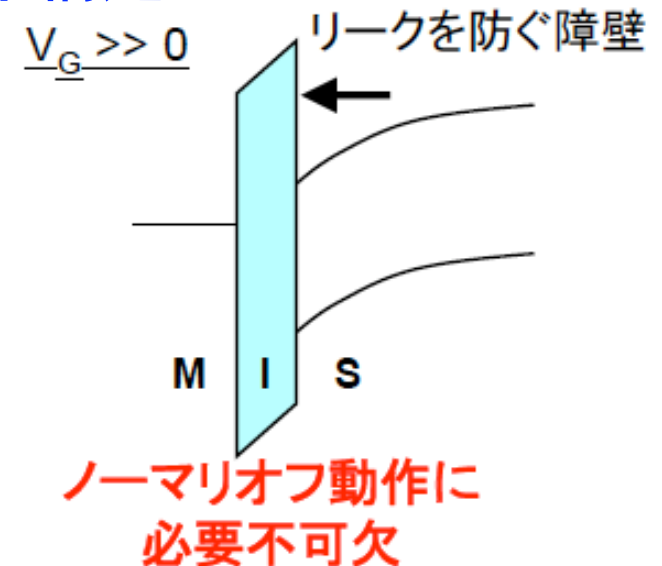


結晶欠陥あるいは不純物に起因した
電子捕獲準位の解明が必須

ノーマリオフ動作



絶縁ゲート構造



戦略的創造研究推進事業 (JST-CREST)

課題：異種接合GaN横型トランジスタのインバータ展開



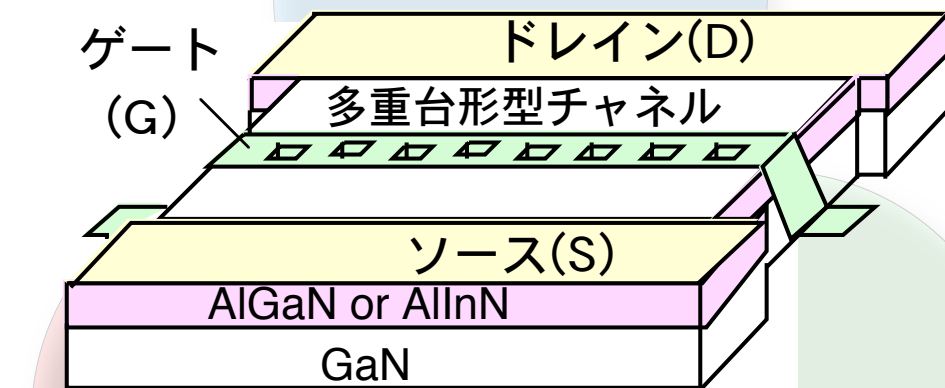
研究領域：二酸化炭素排出抑制に資する革新的技術の創出

2009.10 - 2014.3 (4年半)

Core Research for Evolutional Science and Technology

性能革新

異種接合制御と
新チャネル構造



電子準位評価と
デバイス劣化機構

HEMTインバータの
設計／作製／評価

信頼性

回路展開

次世代インバータへの新たな切り口

CREST- 研究組織

研究代表者
橋詰 保（北海道大学）

豊田中央研究所
エレクトロニクス研究部
化合物半導体研究室

リーダー 室長 加地 徹
室員 5名

北海道大学
量子集積エレクトロニクス
研究センター

リーダー 教授 橋詰 保
研究員2名
博士課程 4名
修士課程 4名

山口大学
理工学研究科
情報・デザイン工学系

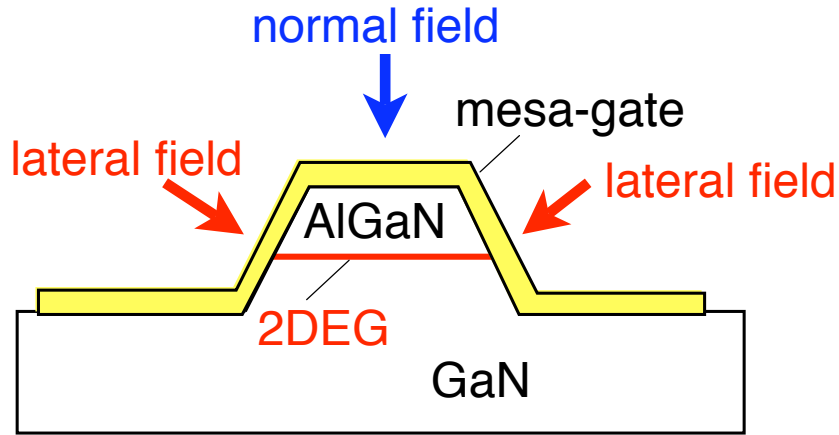
リーダー 教授 田中 俊彦
准教授、助教
博士課程1名

高品質の結晶成長
インバータ作製・評価

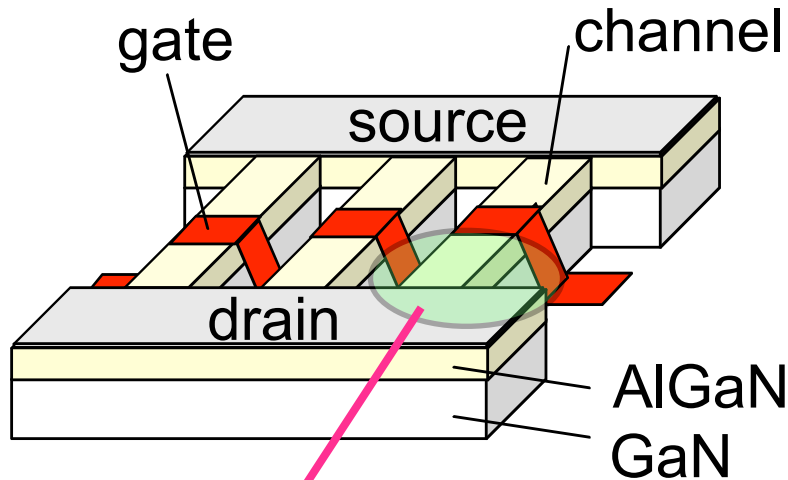
トランジスタ作製・評価
異種接合制御
電子捕獲準位と信頼性

インバータ回路設計
シミュレーション
インバータ性能評価

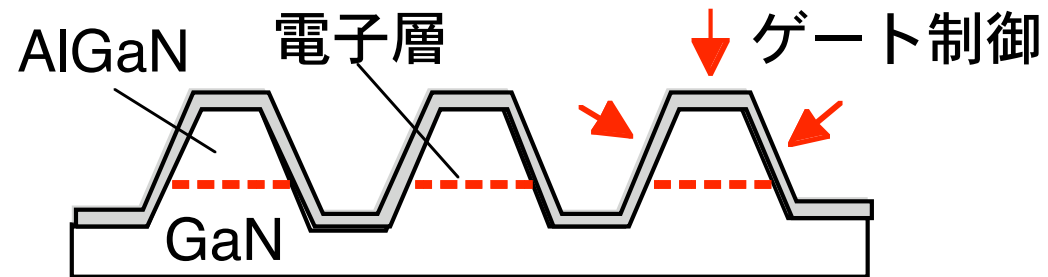
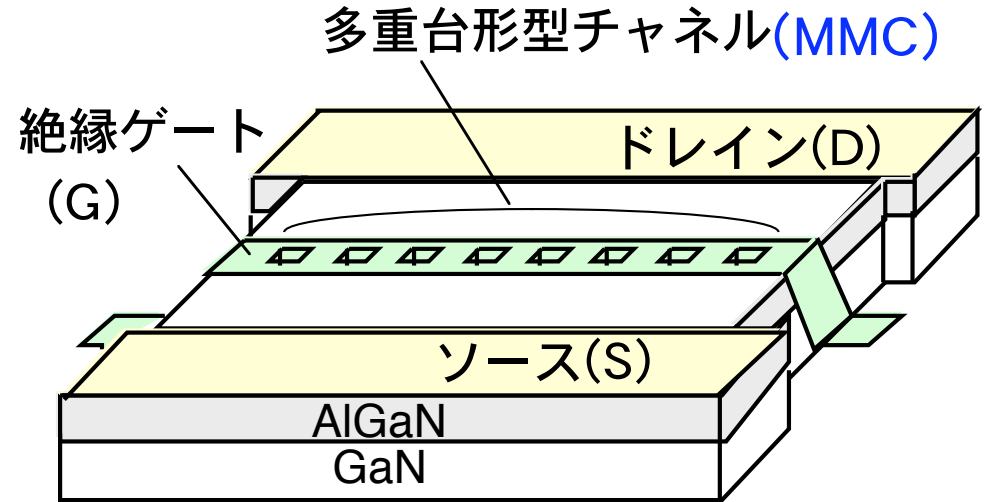
新チャネル構造-多重台形型AlGaN/GaN HEMT



並列細線チャネル型



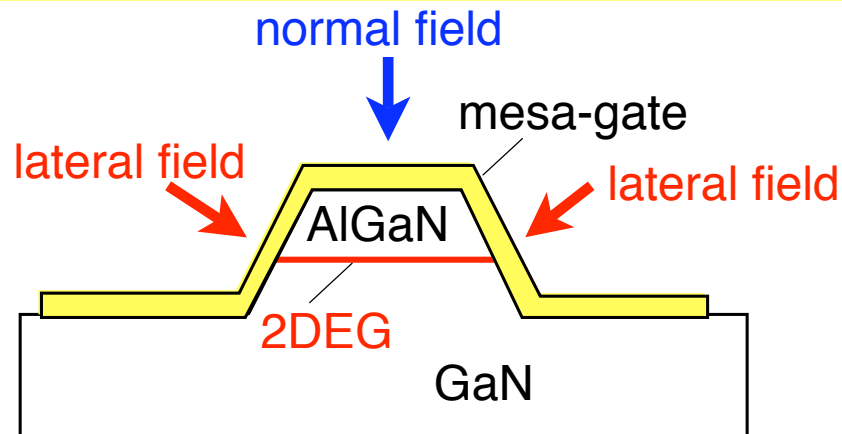
細い部分の抵抗のため
損失が大きくなってしまふ



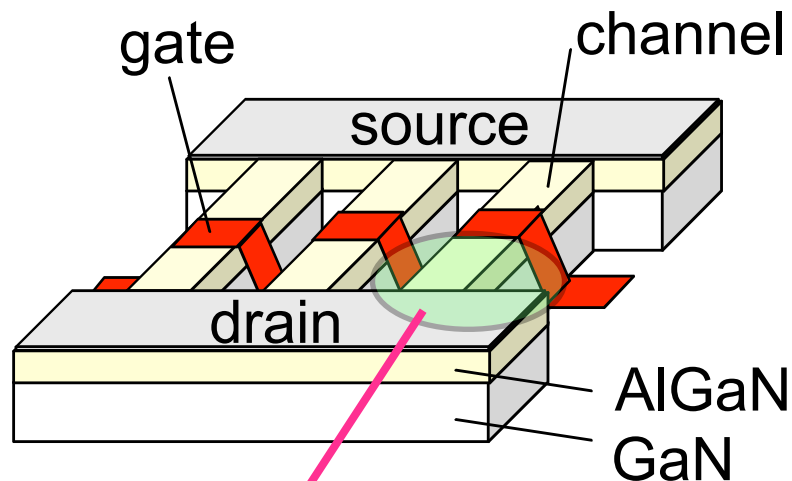
囲い込み電界効果

MMC: Multi-Mesa-Channel

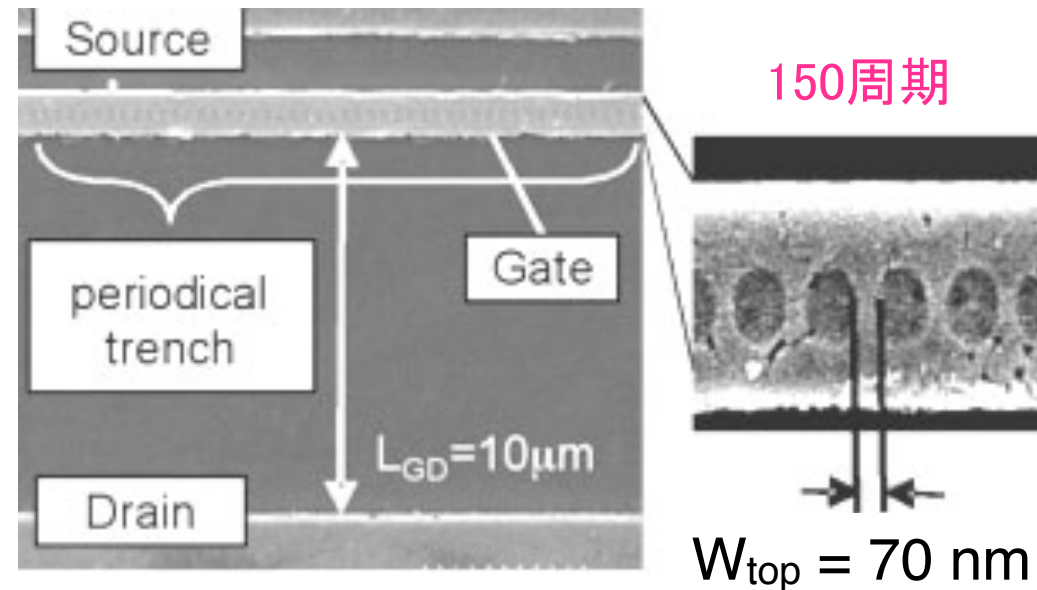
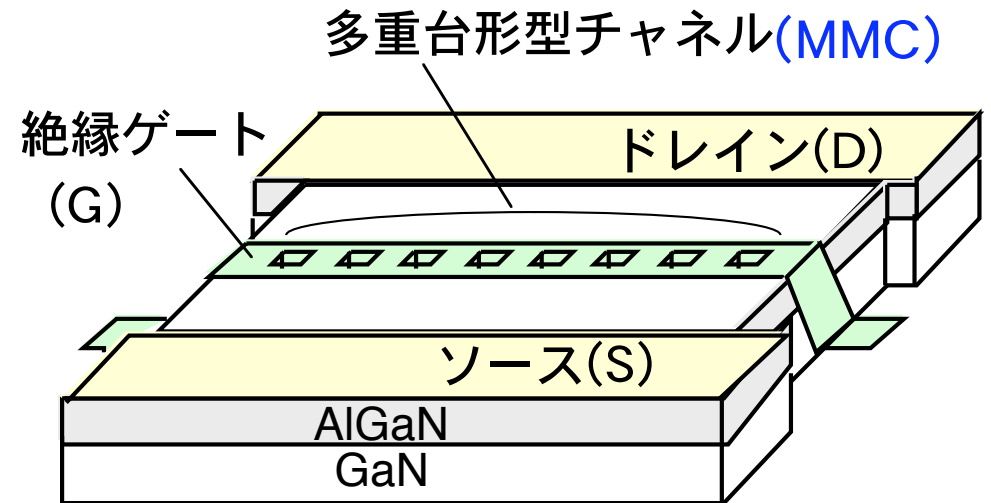
新チャネル構造-多重台形型AlGaN/GaN HEMT



並列細線チャネル型



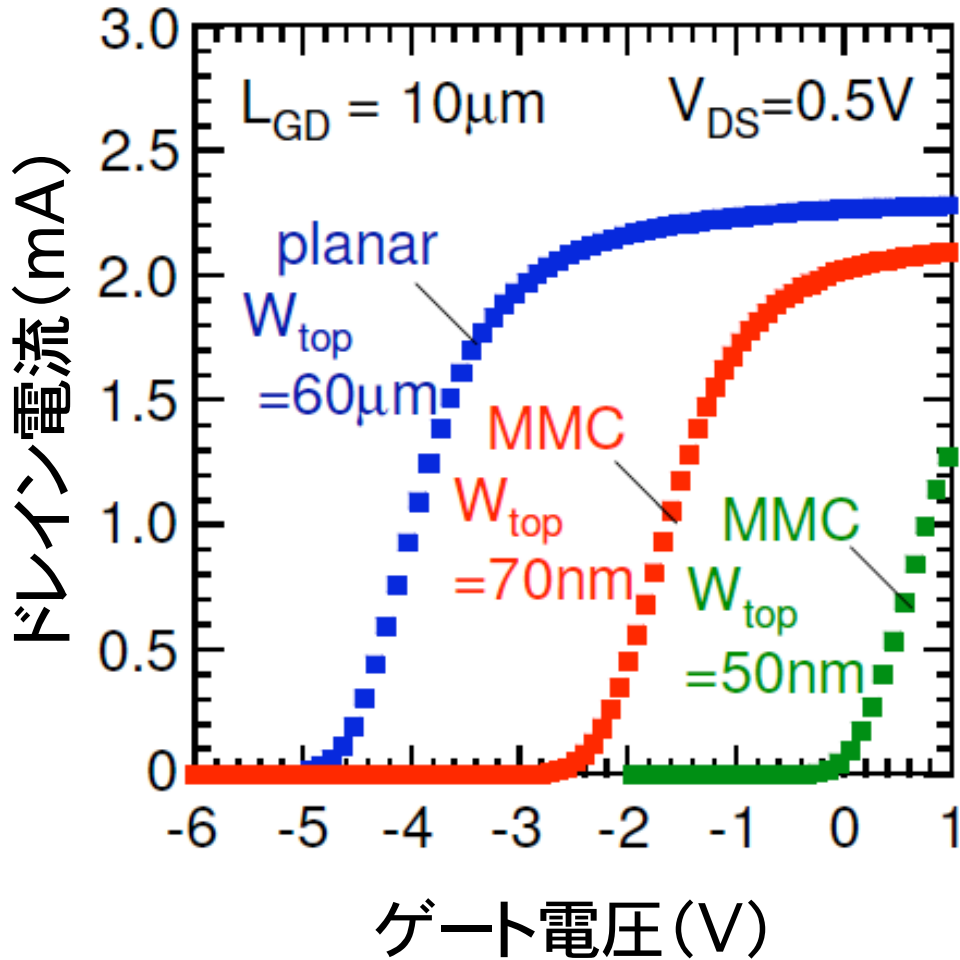
細い部分の抵抗のため
損失が大きくなってしまふ



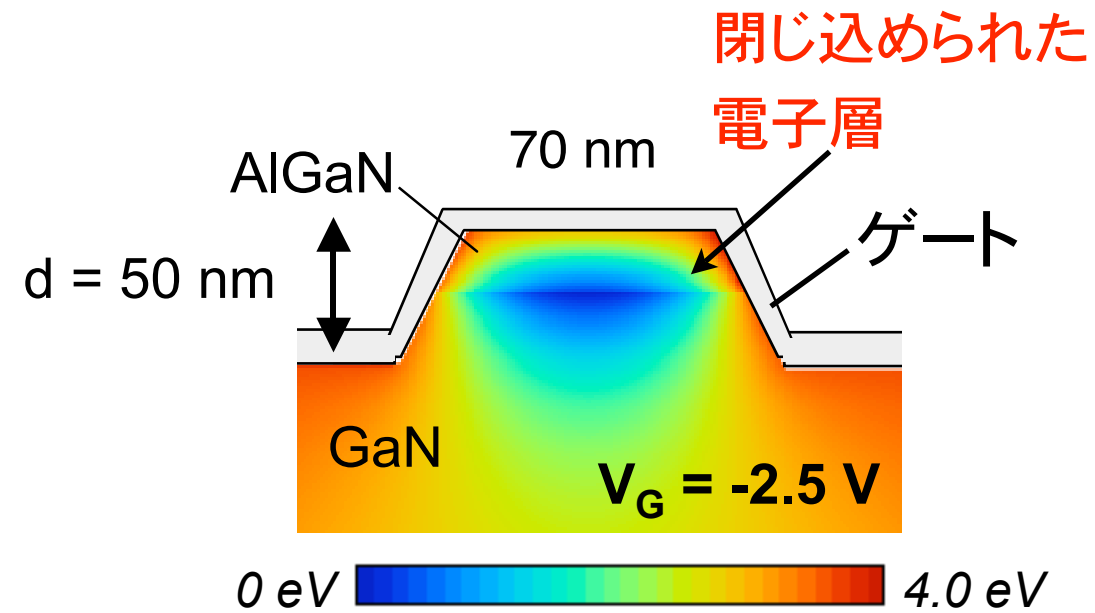
MMC: Multi-Mesa-Channel

MMC HEMTのしきい値制御

入出力特性の制御



ポテンシャル分布



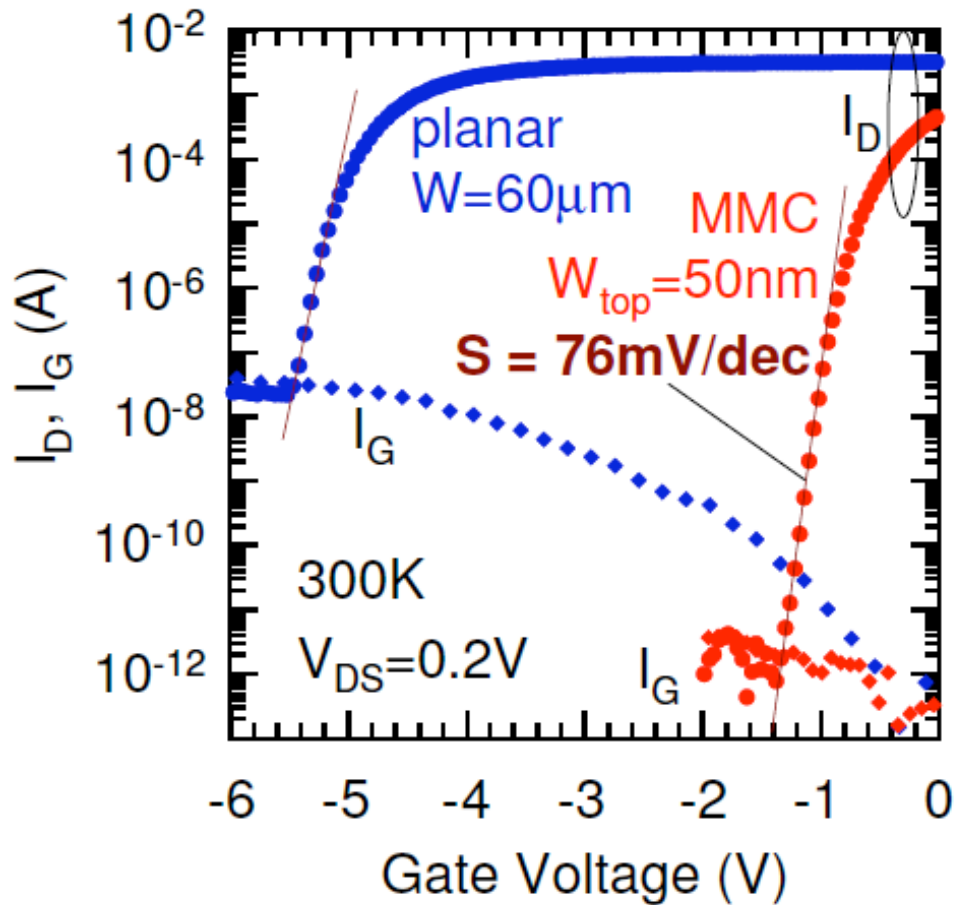
浅いしきい値



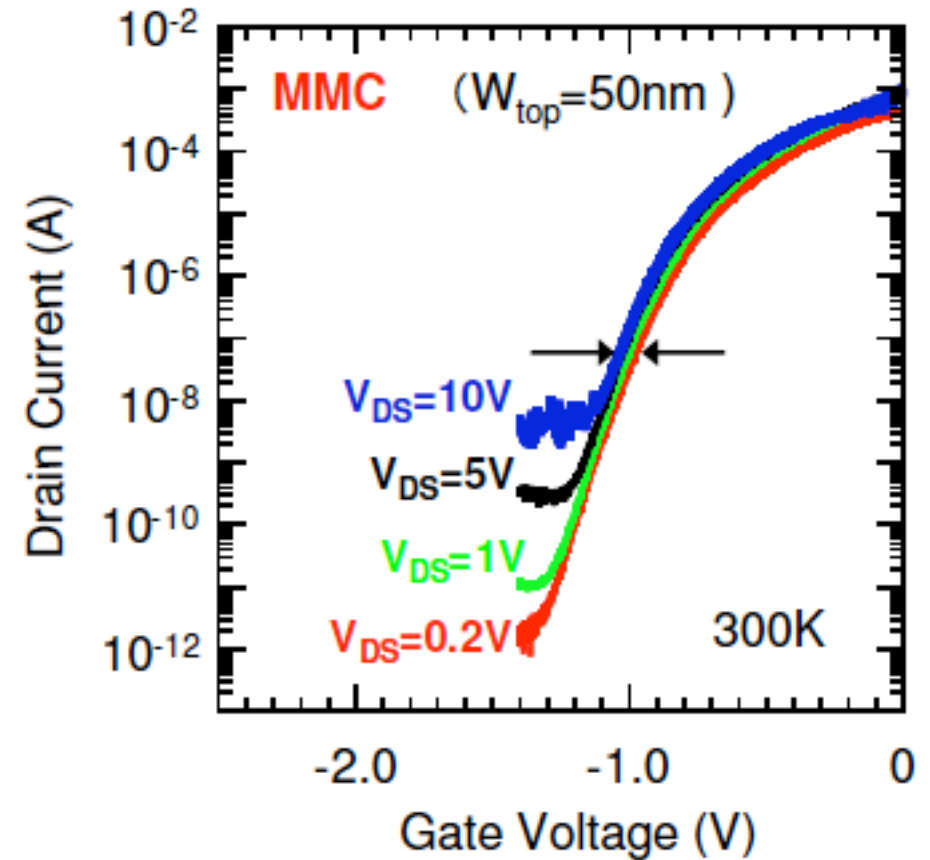
困り込み電界効果

MMC HEMTのゲート制御性

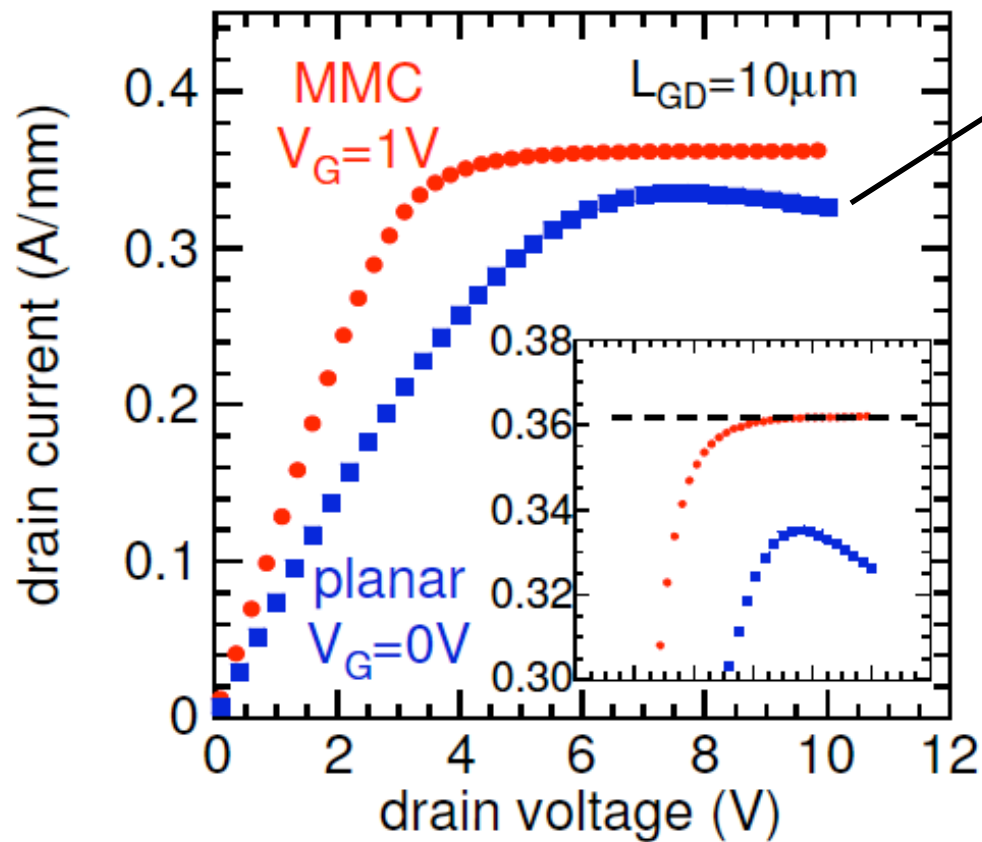
On/Offの切れの良さ



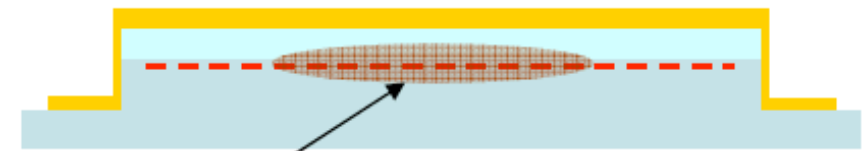
□ $I_{\text{DS}}-V_{\text{G}}$ 特性のドレインバイアス依存性



MMC HEMTの電流安定性

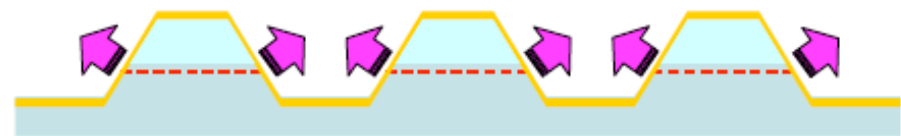


通常の構造 蓄熱



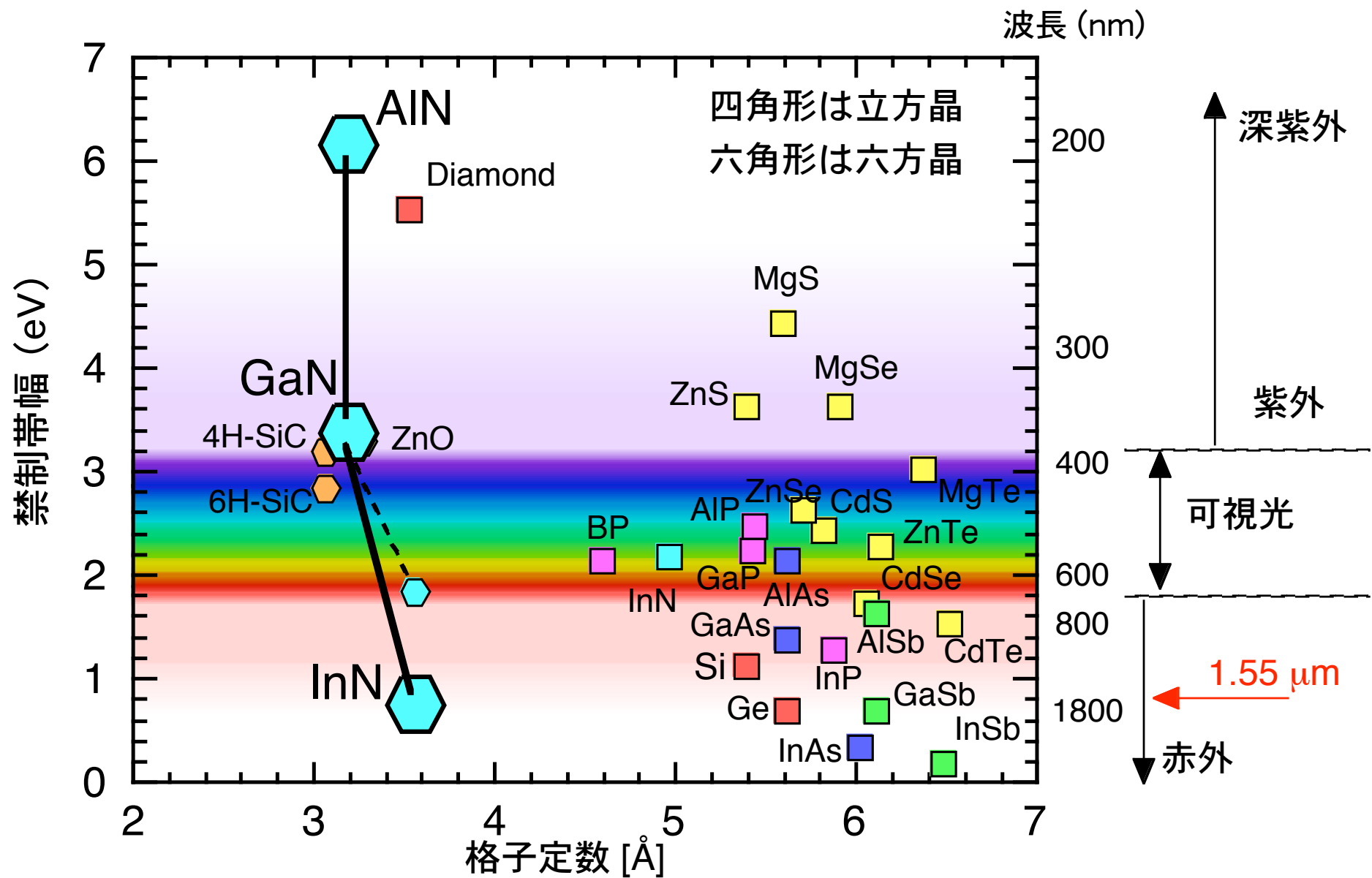
温度上昇により移動度が低下し電流が低下する

・ MMC HEMT



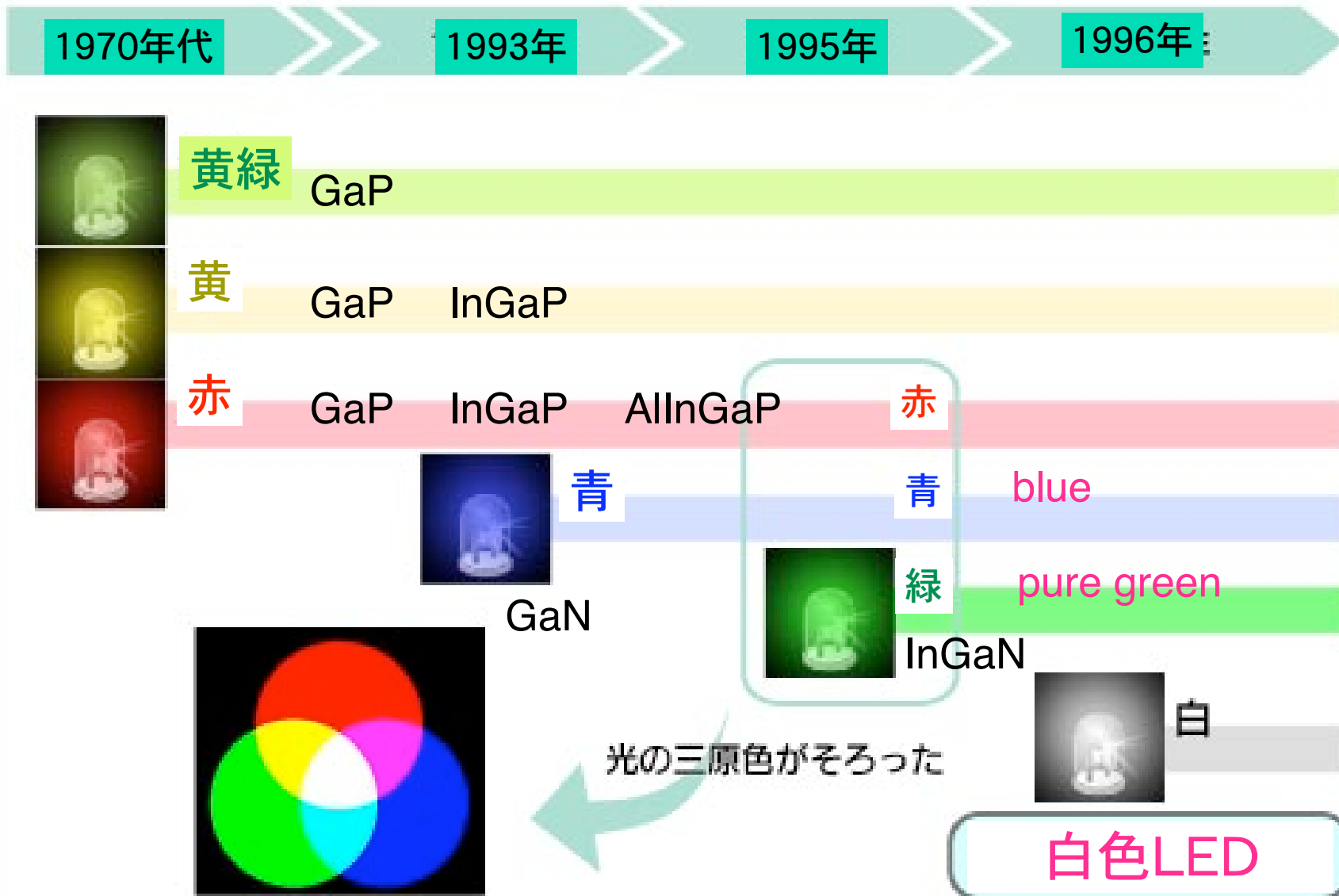
50nm程度の寸法のため
効率的な熱放散

窒化物半導体のポテンシャル



発光ダイオード(LED)開発の流れ

LED実用化時期

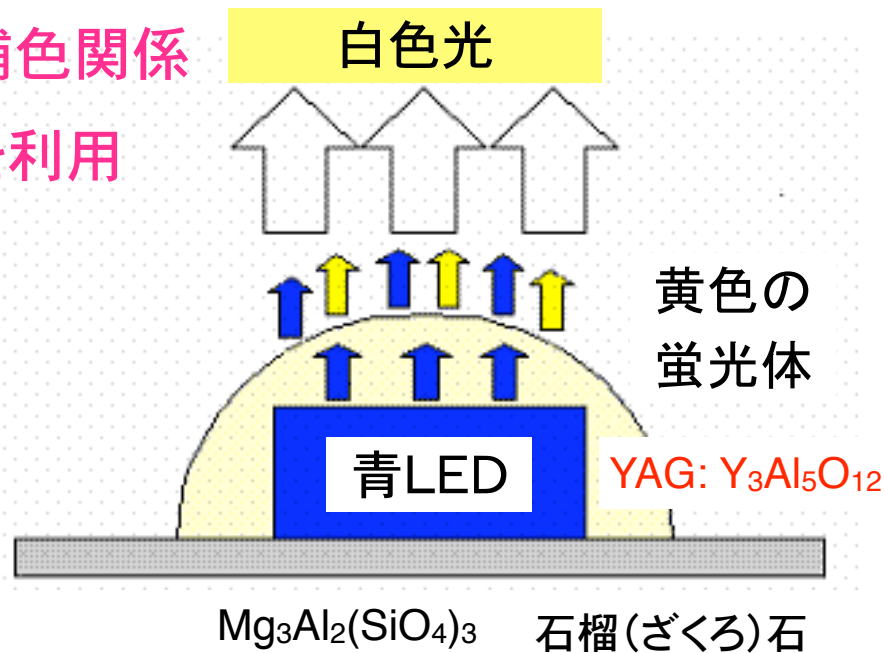


白色LED

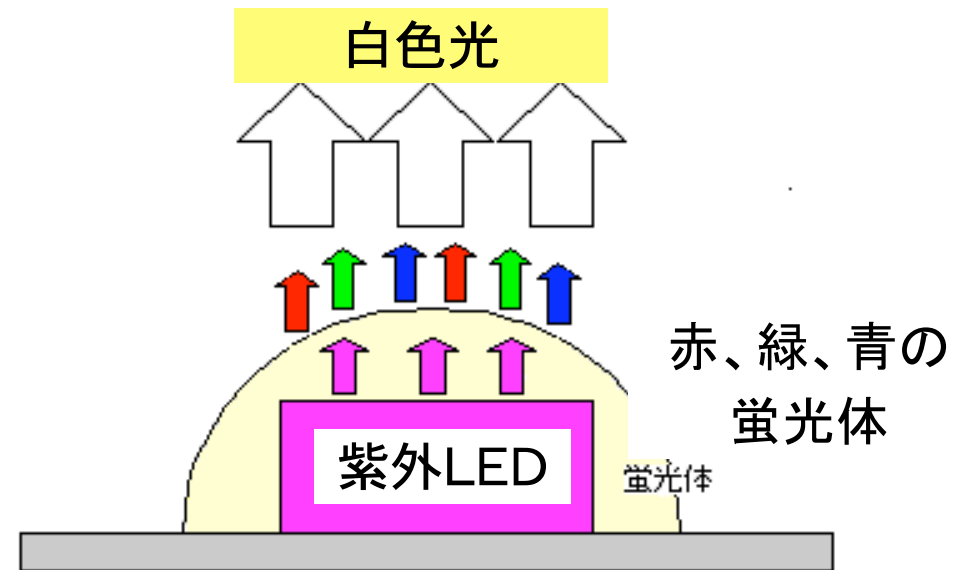
白色光を得る方法—主として3つの方法

- ・光の3原色(RGB)を合成
- ・青色光で黄色の光を誘導—補色光の合成
- ・紫外光でRGBの蛍光体を発光

補色関係
を利用



課題: 演色性が悪い、出力小さい



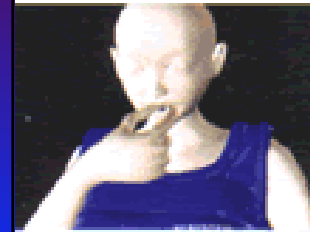
課題: 蛍光体の開発、LED出力

白色LEDの応用

室内用LEDランプ



カプセル型内視鏡
白色LED
CCDカメラ
無線データ伝送



超小型の
使い捨て内視鏡

北海道の国道の照明

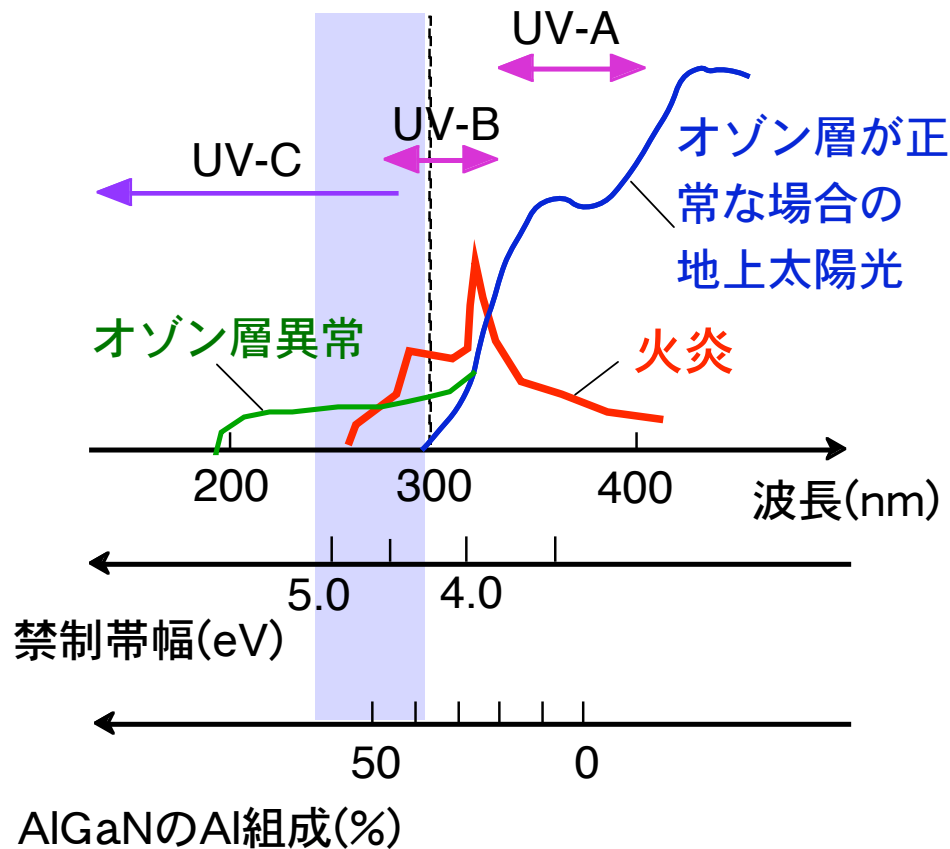
LEDランプに交換する計画



消費電力は蛍光灯の1/5以下

窒化物半導体のその他の応用

紫外光・火炎センサー



照明や太陽光には不感で
 選択的に有害UVや火炎を検知

ガス・溶液センサー

化学的安定性
 高温動作

太陽電池

$E_G=0.7\text{eV}$ のInN 波長 $1.78\mu\text{m}$
 $E_G=6.1\text{eV}$ のAlN 波長 $0.2\mu\text{m}$

太陽光スペクトルのほぼ全域を
 カバー

まとめ

省エネルギーの推進には「次世代インバータ」の開発が必須

GaNおよびSiCの破壊電界はSiの10倍



動作損失がSiの1/10以下に低減できる

異種接合を利用してGaNは横型素子も可能—集積化に有利

基板がない → 基板を選ばない

しかし、多くの課題点を残している

光デバイス、センサー応用としても進化を続けている