

# 非線形光学材料の使用用途の別事例 ＜GaN:パワー半導体デバイス材料＞

大阪大学大学院 工学研究科  
電気電子情報工学専攻 修士2年

遠藤清人



大阪大学大学院工学研究科  
電気電子情報工学専攻 電子工学コース  
創製エレクトロニクス材料講座 機能性材料創製領域  
**森研究室**  
MORI LABORATORY



大阪大学 全学教育推進機構  
**教育学習支援部**  
Department of Teaching & Learning Support



未来の大学教員養成プログラム  
FUTURE FACULTY PROGRAM

## 自己紹介・本講義の位置づけ・到達目標

### 第1章 ワイドバンドギャップ半導体材料(GaN)

- ・ 非線形光学材料であるGaN結晶
  - ・ QPM(疑似位相整合)について
  - ・ ワイドバンドギャップ半導体材料でもあるGaN結晶
- 【まとめ問題】

### 第2章 パワーデバイスの基礎

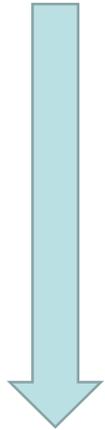
- ・ 現状よく使用されるパワーデバイスの種類
  - ・ パワーデバイス開発のポイント
  - ・ MOSFET、IGBTの現状
- 【まとめ問題】

### 第3章 GaN系パワーデバイスの現状と課題

- ・ GaN系パワー半導体デバイスの現状
- 【グループディスカッション】

## まとめ

## 本講義の位置づけ



1. 線形光学
2. 非線形光学 ○ ○ ○
3. 位相整合
4. 高調波発生、テラヘルツ発生



非線形光学材料の使用用途の  
別事例(パワーデバイス)を学ぶ

## 到達目標

(各目標はまとめ問題やグループディスカッションに対応)

1. 複屈折とQPMを用いた位相整合の違いを説明できる
2. 他デバイスと比較してのMOSFETとIGBTの特徴を3つ以上挙げられる
3. GaN系パワーデバイスの課題を見つけ、その解決策を推論できる

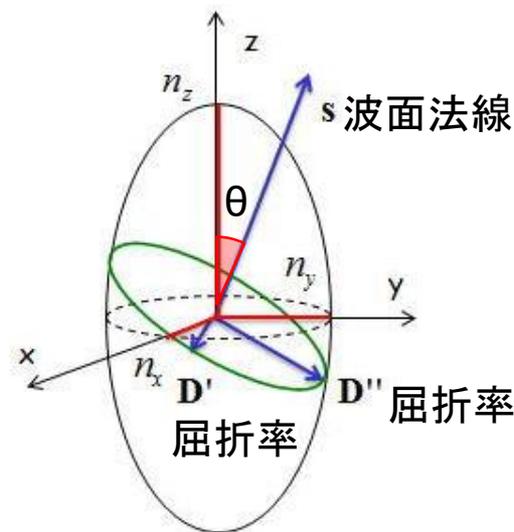
# 第1章 ワイドバンドギャップ半導体材料 (GaN)

※黒澤宏著「まるわかり非線形光学入門」オプトロニクス社 (2008).

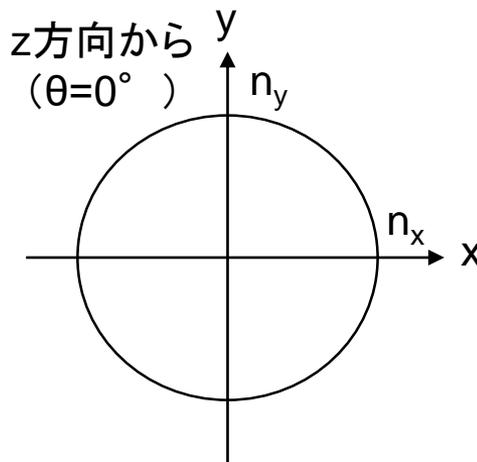
代表的な非線形光学結晶 (@ $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ )

非線形光学結晶	結晶系	透明波領域 [ $\mu\text{m}$ ]	非線形光学定数 [ $\text{pm/V}$ ]	位相整合法
水晶 ( $\text{SiO}_2$ )	三方晶	0.16-3	$d_{11}=0.30$	QPM
KDP ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )	正方晶	0.16-1.5	$d_{36}=0.39$	複屈折
KTP ( $\text{KTiOPO}_4$ )	斜方晶	0.35-4.5	$d_{31}=3.7, d_{32}=2.2,$ $d_{33}=15$	複屈折 QPM
LBO ( $\text{LiB}_3\text{O}_5$ )	斜方晶	0.16-2.6	$d_{31}=-0.67, d_{12}=0.85$	複屈折
CLBO ( $\text{CsLiB}_6\text{O}_{12}$ )	正方晶	0.18-2.7	$d_{36}=0.74$	複屈折
GaAs	六方晶	0.87-14	$d_{36}=83$	QPM
<b>GaN</b>	<b>六方晶</b>	<b>0.37-13.5</b>	<b><math>d_{33}=17</math></b>	<b>QPM</b>

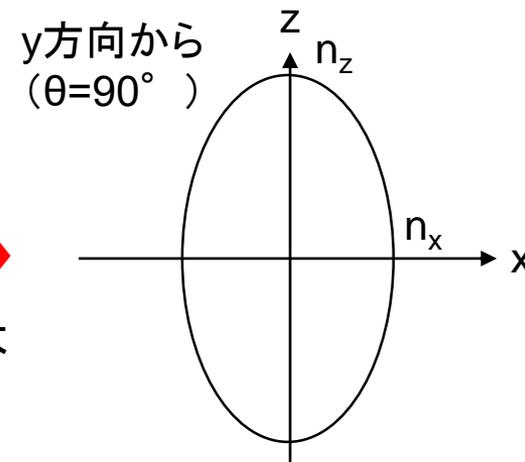
**GaN結晶  $\Rightarrow$  QPM(疑似位相整合)構造により導波路型波長変換デバイスに特性**



屈折率楕円体(正の一軸性結晶)



複屈折なし  
⇒ 光学軸又は光軸



複屈折最大

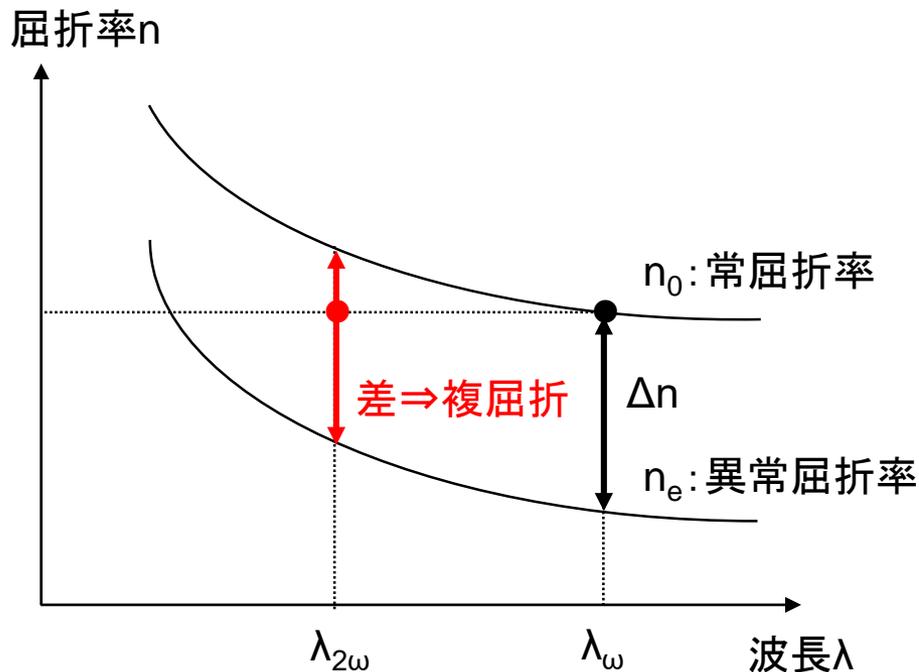
$\theta$ によらず一定の屈折率 ⇒ 常屈折率  $n_0$  ( $n_x=n_y$ )

$\theta$ によって変化する屈折率  $n(\theta)$  ⇒ 異常屈折率  $n_e$  ( $n_z$ )

この差が大きいと...  
複屈折大

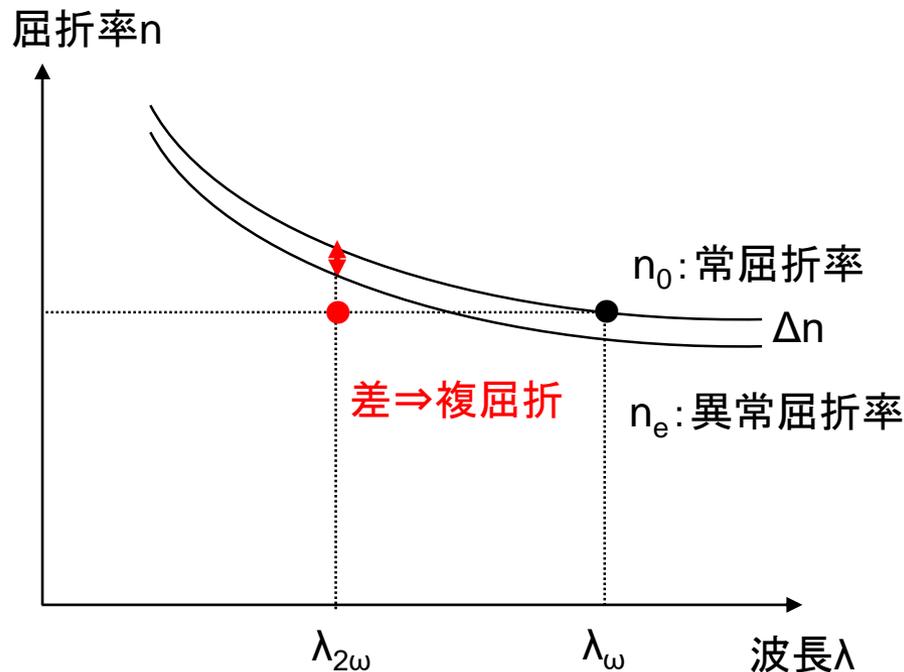
(※異常屈折率は  $n(\theta)$  を表す言葉だが、慣習的に  $n_0$  ( $n_x=n_y$ ) と対比して  $n_z$  を  $n_e$  とする)

複屈折が大きい場合  
 ※負の一軸性結晶 ( $n_o > n_e$ )



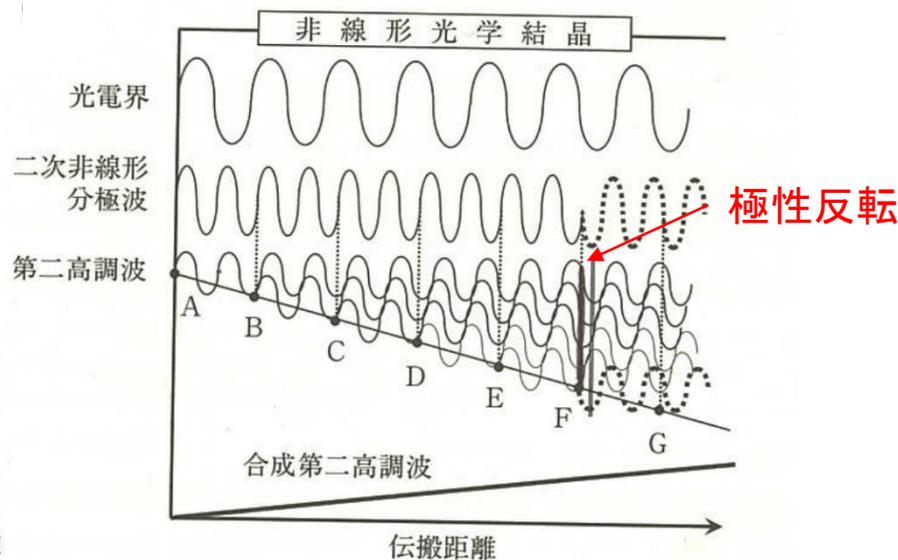
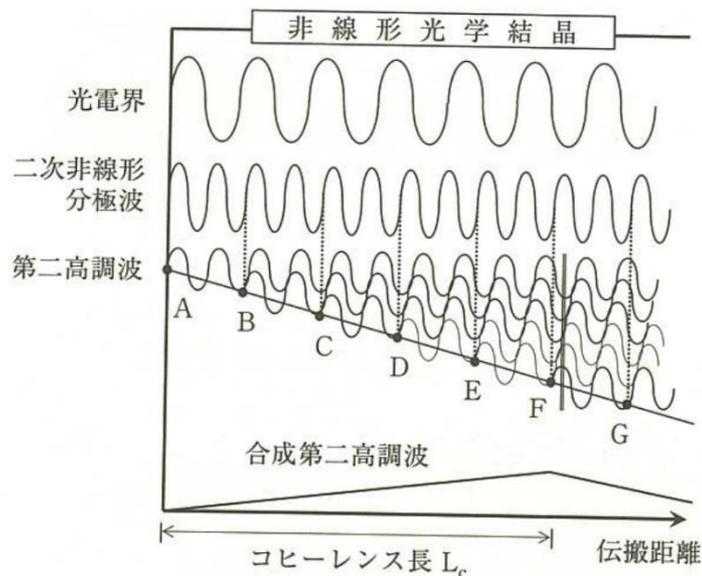
光は  $n_o$  から  $n_e$  まで角度  $\theta$  によって変化  
 ⇒ 適度な  $\Delta n$  の幅によって  $n_\omega = n_{2\omega}$  が可能

複屈折が小さい場合  
 ※負の一軸性結晶 ( $n_o > n_e$ )

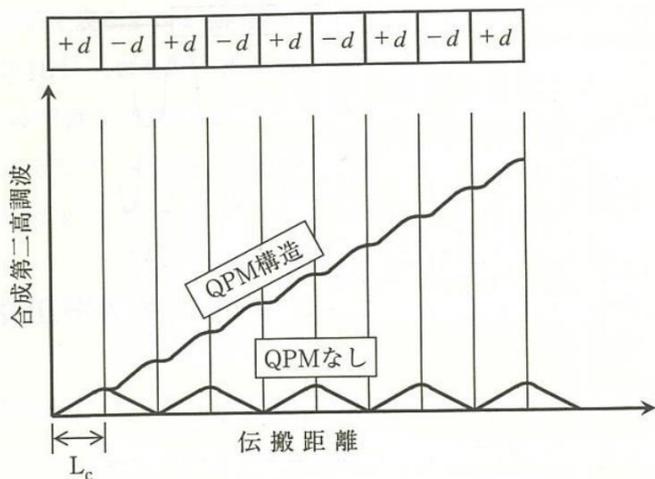


$\Delta n$  が小さく、 $\lambda_\omega = \lambda_{2\omega}$  となる (位相整合する)  $n$  を取ることが出来ない

**複屈折が小さい結晶 ⇒ 非線形光学特性が良くても、位相整合できない！**



非線形光学結晶中での第2高調波発生の様式図



疑似位相整合構造と合成第2高調波

複屈折小さい結晶  
(上手く位相整合できない)  
⇒ コヒーレンス長で第2高調波弱めあう

【周期極性反転構造】  
(弱めあう所で構造を変え、極性反転を行う)  
⇒ コヒーレンス長で第2高調波強め合う

**QPM ⇒ 複屈折小さくても位相整合可能**

※M. A. Mastro, *et al.*, ECS J. Solid State Sci. Technol 6 (2017) 356-359.

## 代表的なワイドバンドギャップ半導体材料

	Si	4H-SiC	GaN	$\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
バンドギャップ [eV]	1.1	3.3	3.4	4.9
絶縁破壊電界 [MV/cm]	0.3	2.5	3.3	8.0
電子飽和速度 [ $10^7$ /cm]	1.0	2.0	3.0	2.0
Baliga指数 対 Si(パワー)	1	320	850	3200
Jonson指数 対 Si(高周波)	1	280	1100	2800
コスト	◎	△	○	○?
信頼性	◎	△	○	△
実用化までの進捗 [%]	100	90	80	40

Si vs GaN ⇒ パワー・高周波デバイスとして約850倍の特性あり

SiC vs GaN ⇒ パワー・高周波デバイスとして約3倍の特性あり

Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs GaN ⇒ 信頼性の面でGaNにメリット、実用化より近い

## GaNの特徴

## 特徴を生かしたデバイス

GaNは非線形材料  
だけではない！

高い非線形光学特性

波長変換デバイス

ワイドバンドギャップ

パワーデバイス

高い絶縁破壊電界

高出力高周波  
デバイス

高電界領域でも高い  
電子ドリフト速度

光デバイス  
(LED, LD)

AlGaIn, InGaIn, AlInNの混晶  
及びヘテロ構造可能

piezoelectric effect

センサー



TOYOTA ROHM SEMICONDUCTOR

MOSFET, IGBT

HEMT



住友電工  
Connect with Innovation



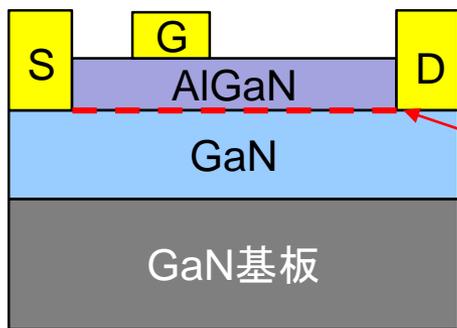
HAMAMATSU PHOTON IS OUR BUSINESS NICHIA SONY

LED, LD, VCSEL

深紫外センサ AsahiKASEI

GaN結晶: 様々なデバイスとして実用化、もしくは実用化が期待されている

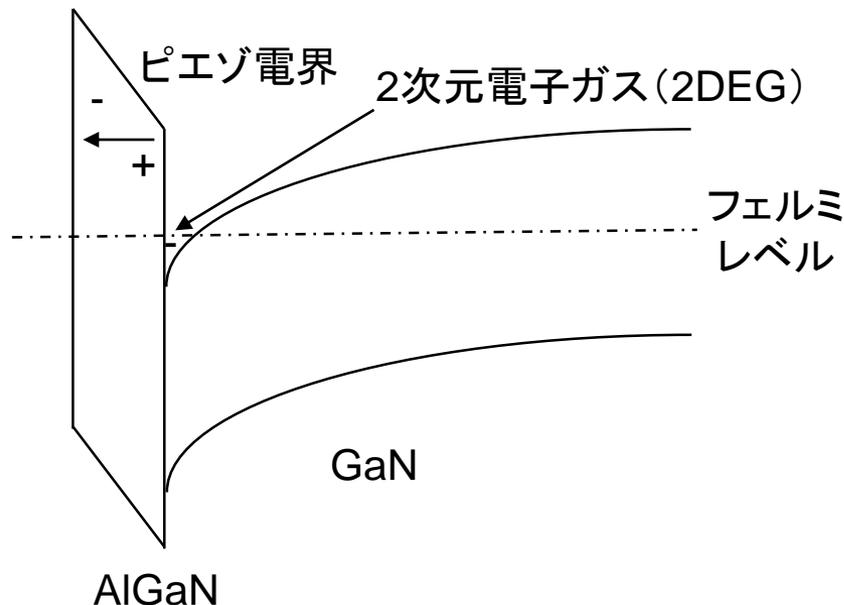
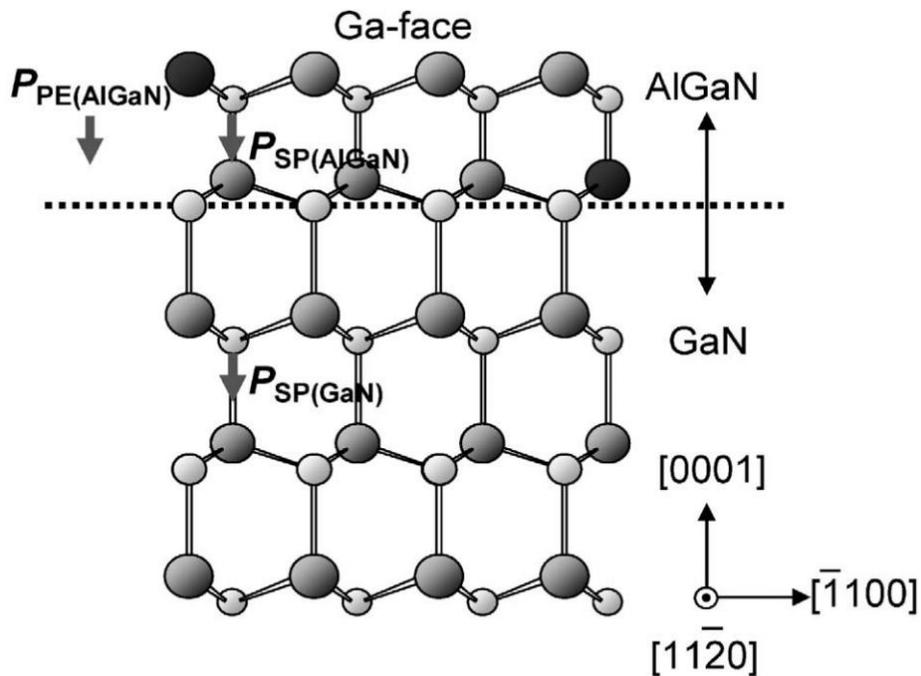
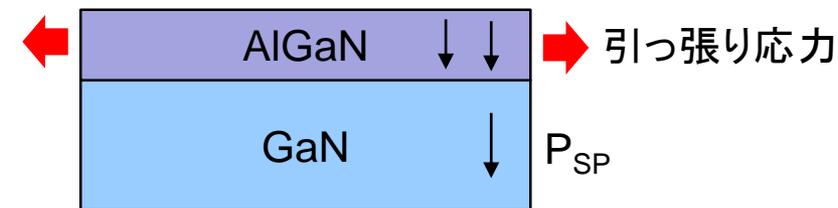
※T. Ueda, et al., J. Vac. Soc. Jpn. 54, 6 (2011).



2DEG  
( $> 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ )

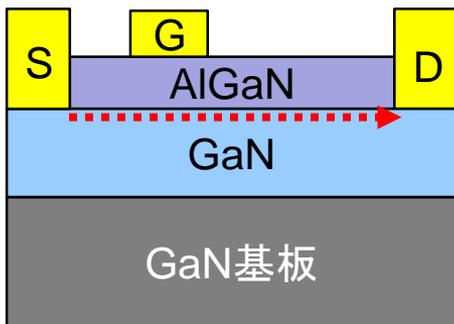
$P_{SP}$ : 自発分極  
 $P_{EP}$ : ピエゾ分極

格子定数差による  
ピエゾ分極発生



自発分極、ピエゾ分極により高い電子密度、電子移動度  $\Rightarrow$  高出力高周波デバイス

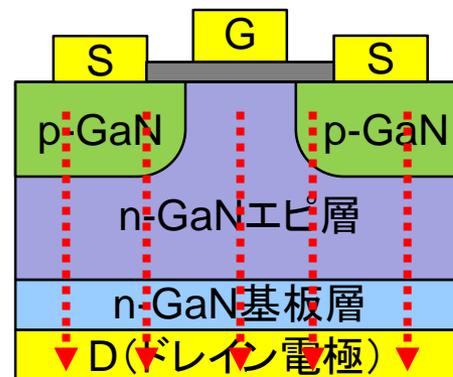
HEMT等横型デバイス



横型素子

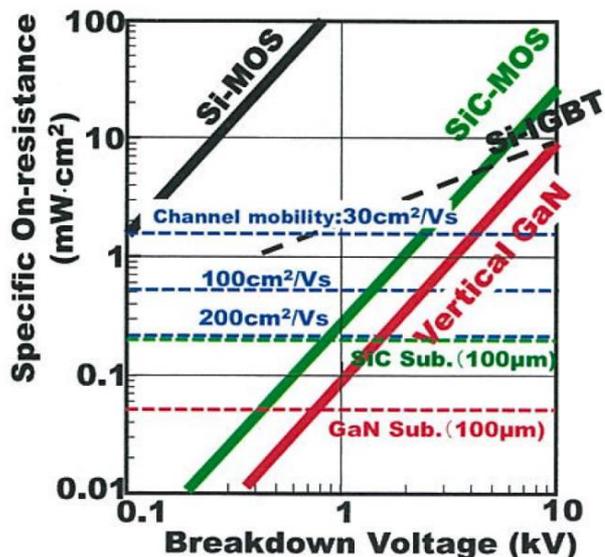
素子表面のみに電流が集中して流れる  
⇒ 高耐圧に向かない

パワーデバイス



縦型素子

素子全体に均一に電流が流れる  
⇒ 高耐圧向き



より高性能のパワーデバイスが求められる



Siは物性特性の限界



GaN系パワーデバイスに期待

色々課題も多い...電流リーク、ノーマリーオフ動作、、、

- ・ GaN結晶はなぜQPMでの位相整合を行うのか。以下の用語を用いて説明せよ。

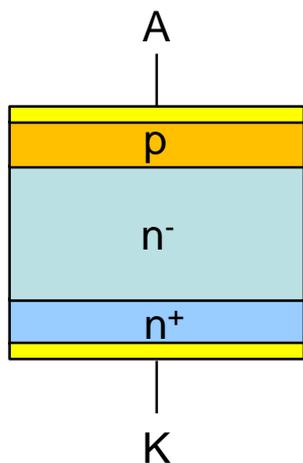
(複屈折、弱めあう、極性反転)

- ・ GaN-HEMTはなぜ高周波デバイスとして実用化しているのか。競合結晶であるSiCとの違いを明確にして説明せよ。

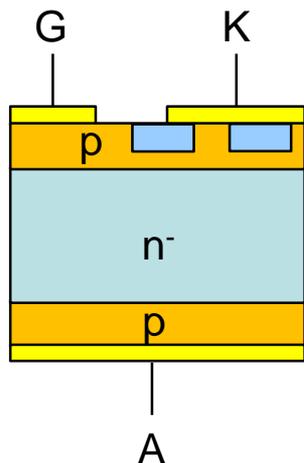
## 第2章 パワーデバイスの基礎

バイポーラ  
デバイス

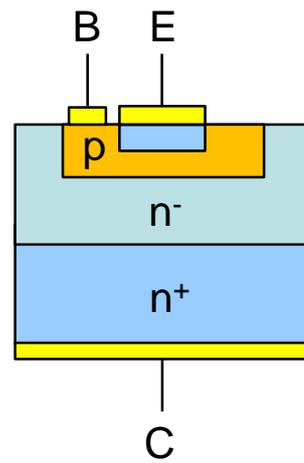
p-n Diode



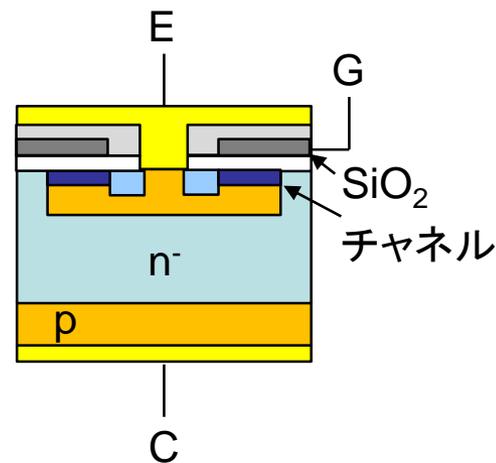
Thyristor



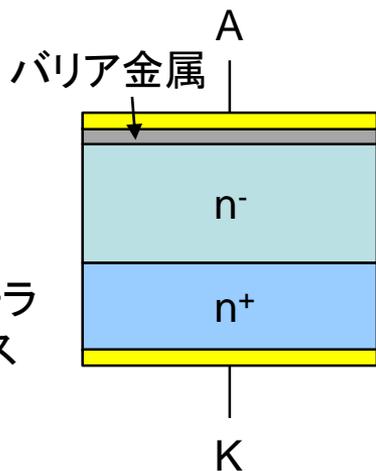
BJT



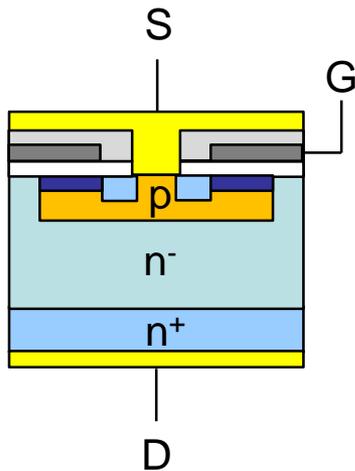
IGBT



SBD



MOSFET



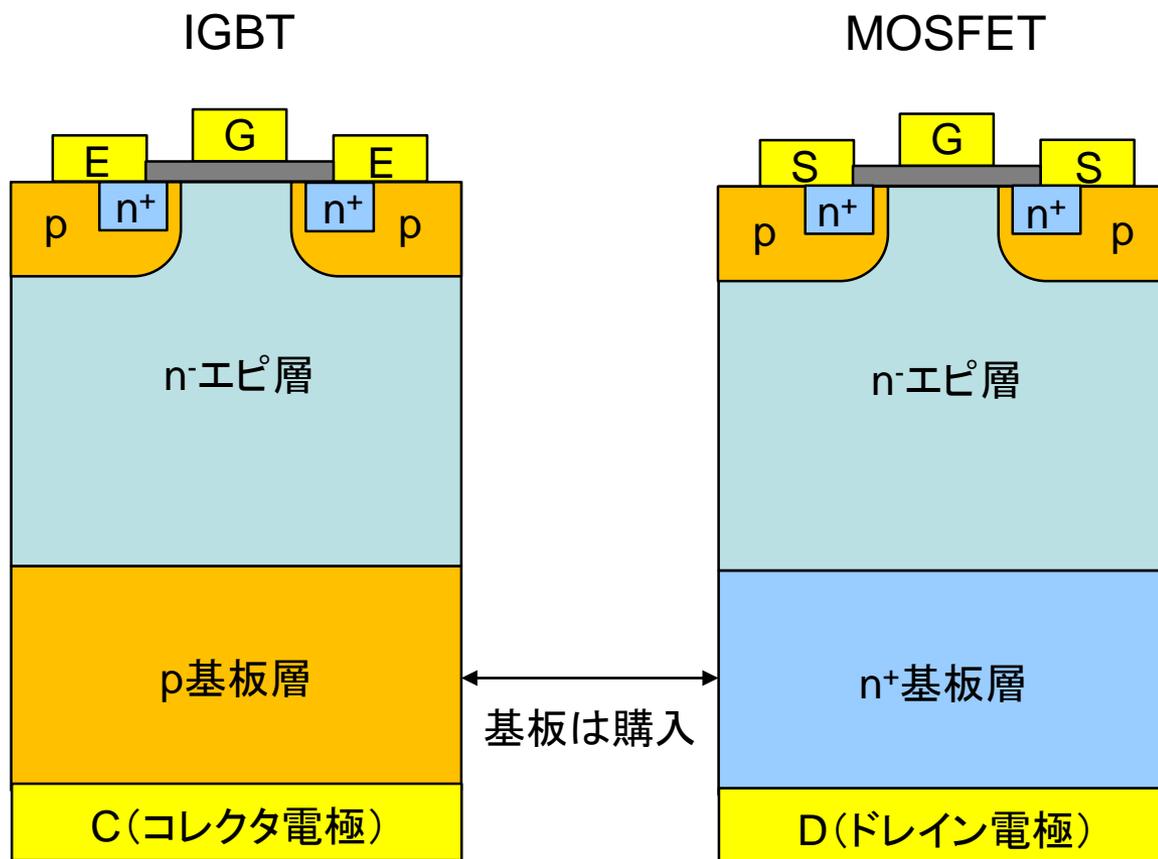
ユニポーラ  
デバイス

・バイポーラ【電子+正孔】

1. オン抵抗低い
2. スイッチング速度遅い
3. 高耐圧向き

・ユニポーラ【電子】

1. オン抵抗高い
2. スイッチング速度速い
3. 低耐圧向き



構造がそっくり  
(基板極性が違うだけ)  
↓  
購入するウェハの  
極性を変更  
↓  
MOSFETのラインで  
IGBTを生産可能  
(設備投資がほぼ不要)

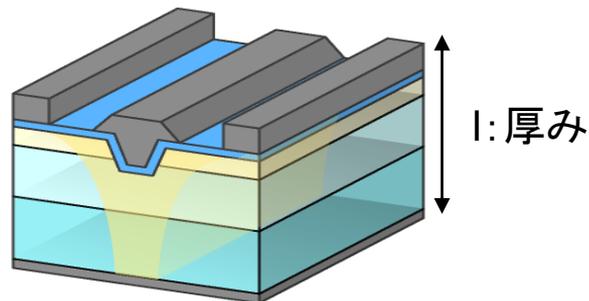
市場からの要求

- ・ コストパフォーマンス
- ・ 機能、性能
- ・ 信頼性(駆動回路が簡単、壊れにくい)

MOSFETと  
IGBTが市場に  
選ばれた理由

## パワーデバイス開発のポイント

$\rho$ : 抵抗率



S: 断面積

$$\mu = \frac{e\tau}{m^*}$$

物質の固有値

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad \rho = \frac{1}{ne\mu}$$

厚みを薄く、断面積を広く

低オン抵抗

トレードオフ関係

高速スイッチ

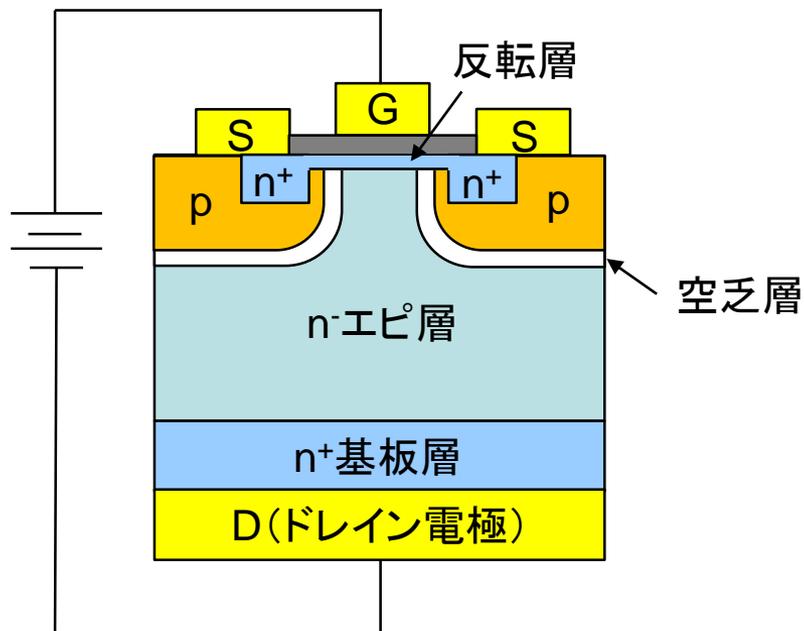
高破壊耐量

$$V = RI$$

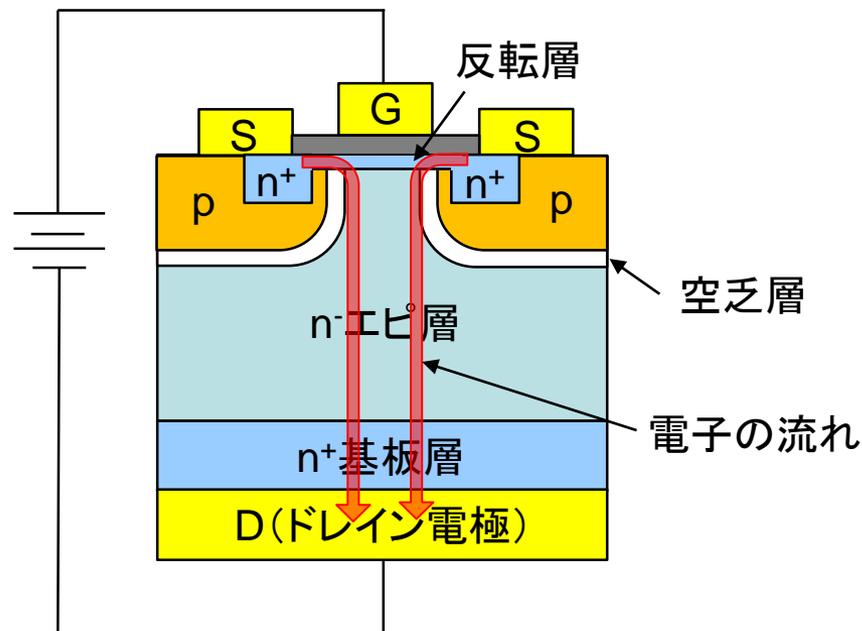
抵抗は高いほど破壊耐量を大きくできる

ポイント: 上記3特性を同時に向上

3特性はトレードオフ関係 ⇒ 同時向上は困難 ⇒ 様々な取り組み

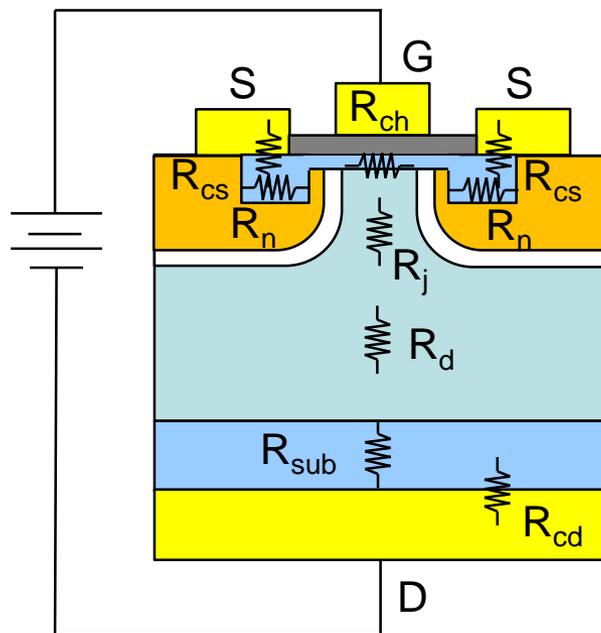


G-S間に電圧を印加  
⇒ ゲート直下に反転層発生



S-D間で自由電子の移動が起きる  
⇒ ドレイン電流が流れ、MOSFETがオンに

- ・ 電圧駆動、絶縁ゲートを介するためゲート電流がほぼ流れない ⇒ **ゲート駆動電力小**
- ・ ドリフト層への少数キャリア蓄積なし ⇒ 排出の遅延時間なく、**高周波動作可能**
- ・ 高耐圧化のため、ドリフト層を厚く、層濃度を薄く ⇒ **オン抵抗が高い**

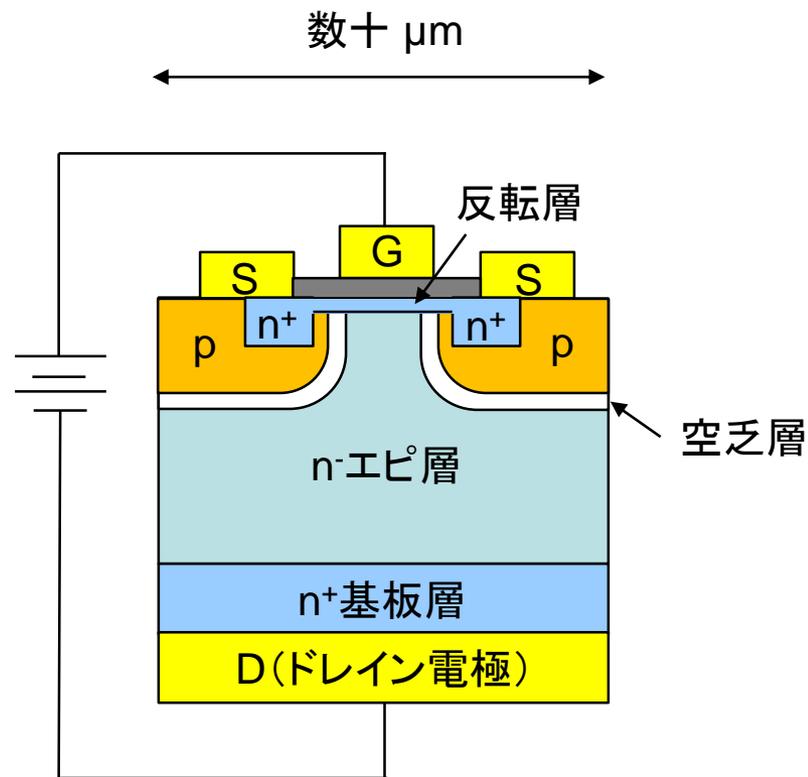


MOSFETの主なオン抵抗成分

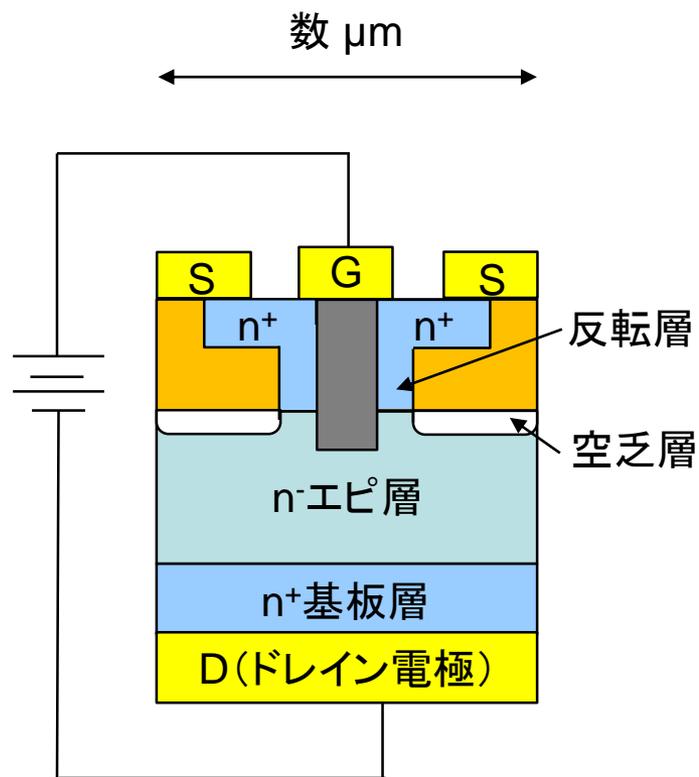
- ・  $R_{cs}$ : ソース電極のコンタクト抵抗
- ・  $R_n$ : ソース領域の抵抗
- ・  $R_{ch}$ : MOSFETのチャネル抵抗  
⇒ 微細なほど抵抗小さい  $\propto W/L$
- ・  $R_j$ : J-fet抵抗  
⇒ 微細なほど抵抗大きい
- ・  $R_d$ : ドリフト層の抵抗  
⇒ およそ耐圧の2.5倍に比例
- ・  $R_{sub}$ : 基板層の抵抗
- ・  $R_{cd}$ : ドレイン電極のコンタクト抵抗

微細化 ⇒ J-fet抵抗が大きくなってしまふ...

ドリフト層の濃度を上げる ⇒ 耐圧が下がってしまふ...



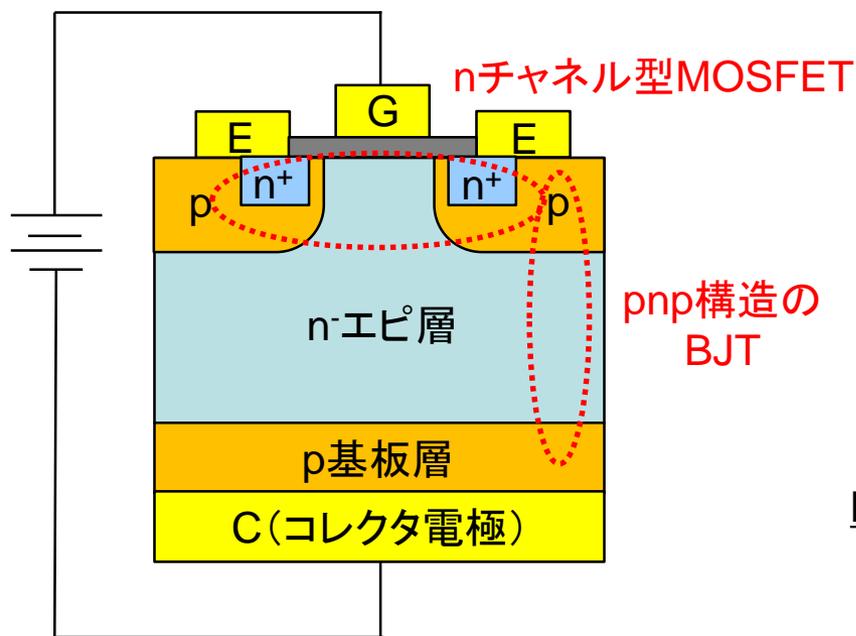
プレーナMOSFET  
(DMOSFET)



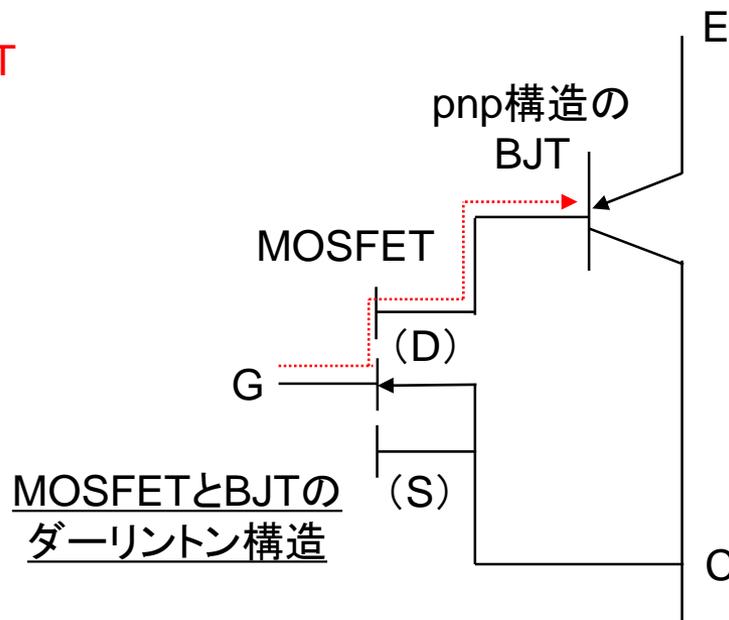
トレンチMOSFET

微細化が可能  $\Rightarrow$  チャネル抵抗を下げられる！  
空乏層の伸び方変化  $\Rightarrow$  J-fet抵抗が無くなる！

低耐圧MOSFETの主流



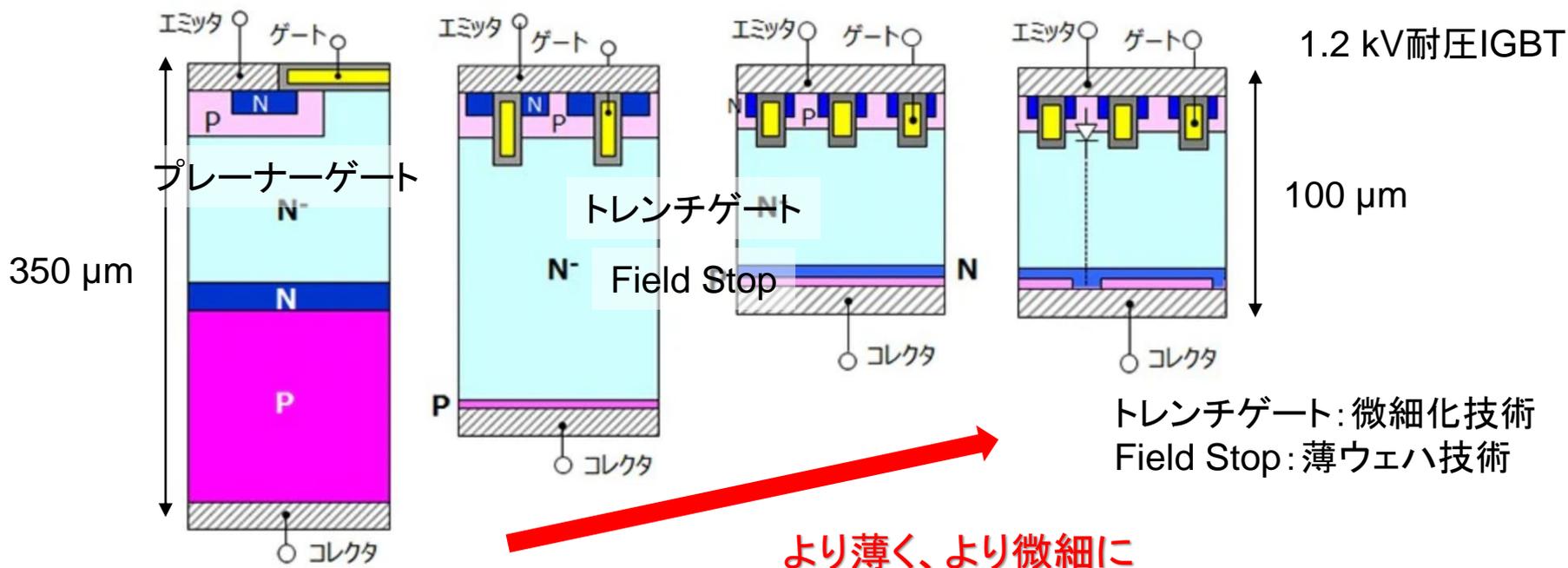
IGBTの構造模式図



IGBTの等価回路図

MOSFETを電圧駆動 ⇒ ゲート電流がpnp-BJTに供給 ⇒ C-E間に電流が流れる

IGBT { BJT: 高耐圧・大電流特性  
 MOSFET: 高速スイッチング特性      ← 両者の利点をいとこどり！



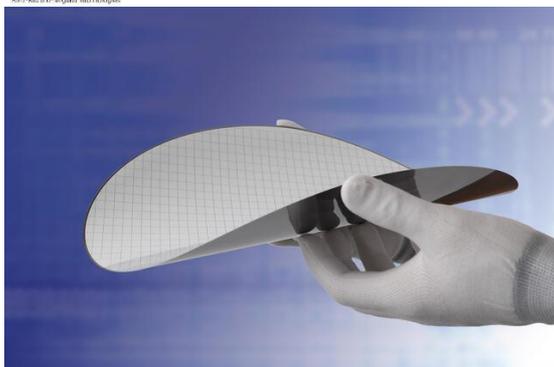
トレンチゲート: 微細化技術  
Field Stop: 薄ウェハ技術

より薄く、より微細に

2003年から  
薄ウェハ化が限界に



研磨技術



(a) PT型IGBT  
(b) NPT型IGBT  
(NPT: Non-Punch-Through)

1998年

100 μmのIGBTウェハ  
⇒割らずに作るの難しい

(c) 薄PT型IGBT  
(FS-IGBT)

2002年

(d) RC-IGBT

2007年～

デバイス構造最適化による  
性能向上は限界へ...  
⇒新デバイス材料に期待



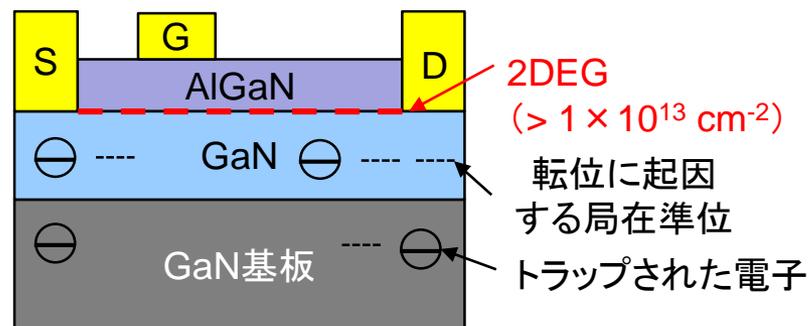
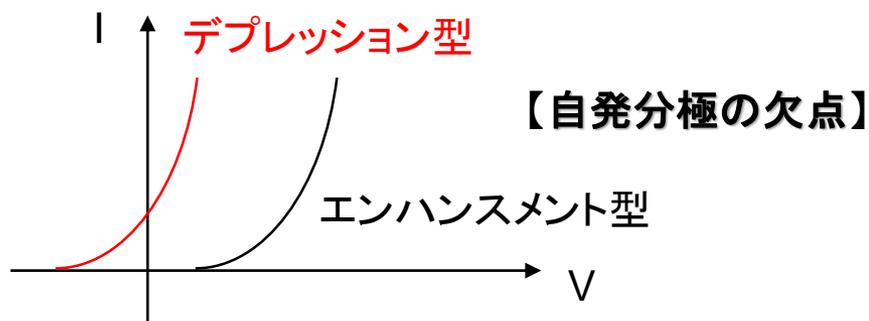
## 第3章 GaN系パワーデバイスの現状と課題

## GaN結晶の応用先

横型パワーデバイス: HEMT ⇒ 実用化

【課題】 ノーマリーオフ動作・電流コラプス抑制・基板コスト

【結晶欠陥による問題】

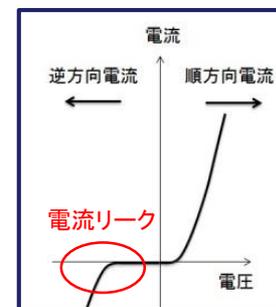
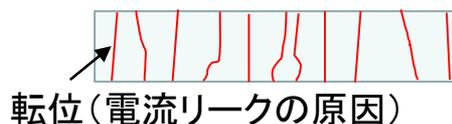


縦型パワーデバイス: パワーMOSFET ⇒ 実用段階

【課題】 電流リーク抑制・基板コスト

【結晶欠陥による問題】

低品質GaNウエハ  
・転位密度が高い  
( $\sim 10^6 \text{ cm}^{-2}$ )



GaN系パワーデバイスを普及させるためには？

## 【流れ】

資料読み込み：5分



ディスカッション：15分



発表：5分(1グループ 1分)



フィードバック：5分

## 【選択肢】

1. p-GaN構造のHEMT
2. カスコード構造のHEMT
3. 溶液成長のMOSFET
4. 気相(他社提携)のMOSFET
5. 気相(独自)のMOSFET
6. 融液成長のMOSFET
7. その他

## 【要旨】

あなたは、某A社のデバイス事業領域の企画職で働いています。近年A社のデバイス事業は、競合の追隨にあい、利益が減少しています。そこで、経営陣は製品の差別化のために、3年以内にGaN系デバイスの市場導入を事業戦略として発表しました。あなたは、各部門から話を聞いて、何のデバイスを導入するか考えます。

## 第1章 ワイドバンドギャップ半導体材料(GaN)

- ・ 複屈折の小さい結晶 ⇒ QPM(疑似位相整合)で位相整合可能
- ・ GaN: 高い物性特性 ⇒ パワーデバイスへの応用が期待  
(特にヘテロ接合への特性・ピエゾ効果によりHEMTは実用化)

## 第2章 パワーデバイスの基礎

- ・ MOSFET, IGBT ⇒ **コスト・機能・信頼性**の観点から今日のデバイスの主役
- ・ MOSFET: **高周波**動作可能 オン抵抗**高い**
- ・ IGBT: **高耐圧・高周波** オン抵抗**低い**

## 第3章 GaNパワーデバイスの現状と課題

- ・ GaN-HEMT: ノーマリーオフ動作、電流コラプス、基板コスト
- ・ GaN-MOSFET: 電流リーク、基板コスト

補足

時間配分の決定・前提条件の確認 お題例:彼女を作るには？

- ・ 時間配分の決定(前提2分、意見出し7分、評価軸5分、結論1分など)
- ・ 前提条件の確認(誰が作るのか?、いつまでに作るのか?、彼女の定義は?)  
⇒電情の阪大生が、今年のクリスマスまでに、同じ大学生の彼女を作るには？

意見出し なぜ現状彼女が作れていないのか? 課題と手段を網羅的に考える

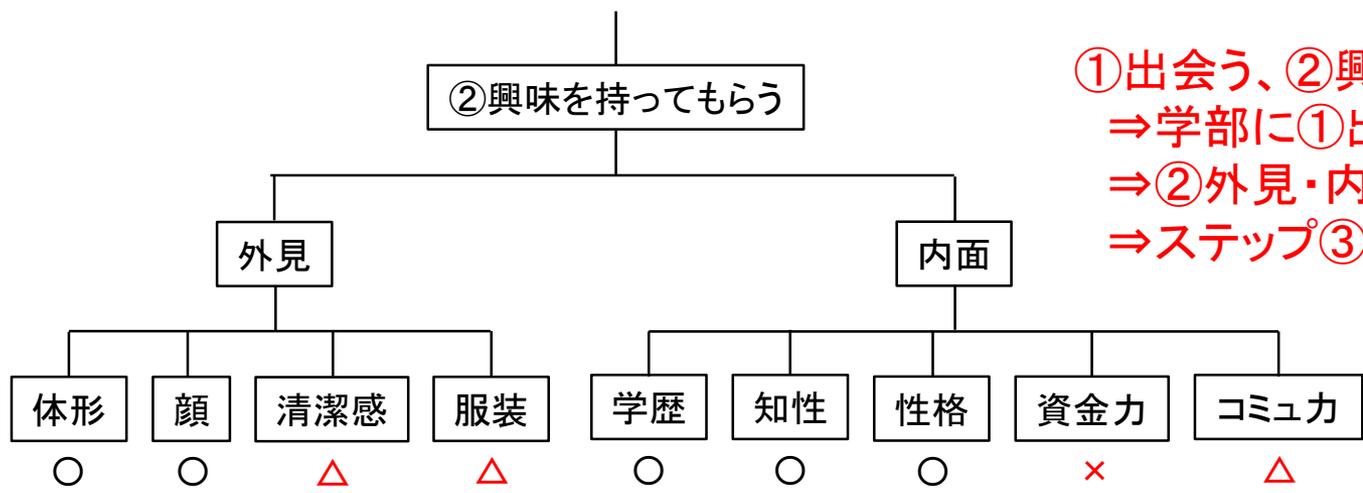
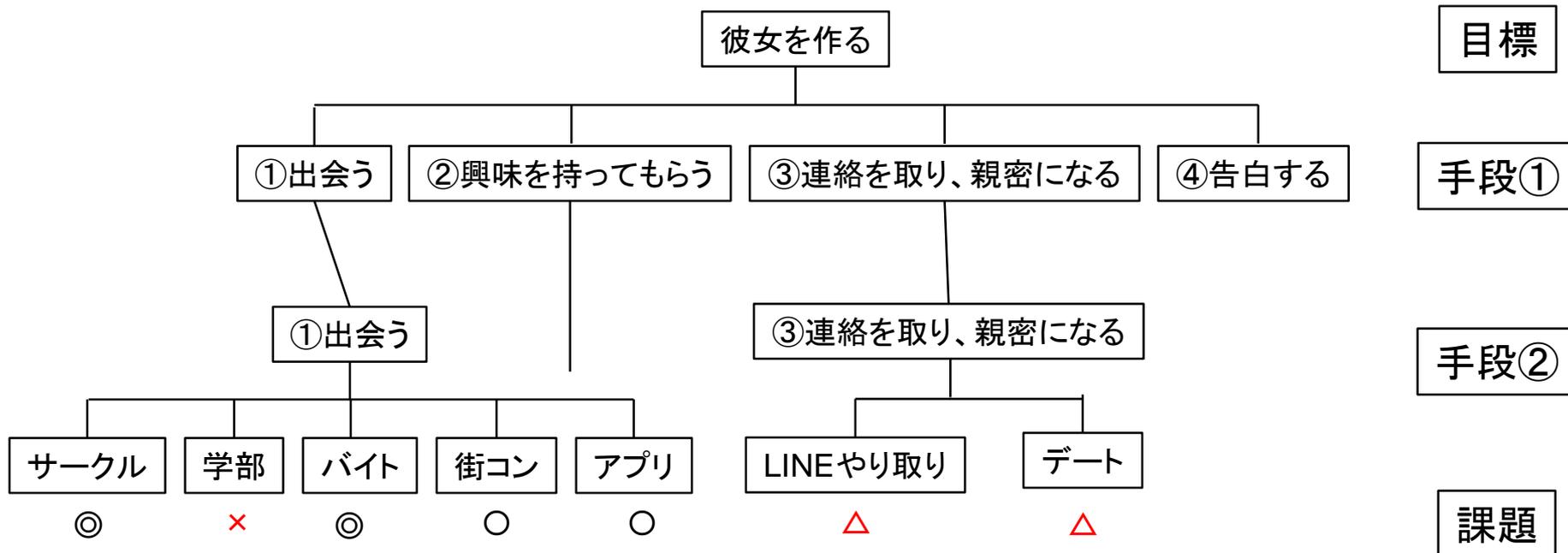
そもそも学部に女子がいない / 外見・内面磨きが出来ていない部分が一部存在

評価軸の決定 何をすれば、彼女を作ることができる可能性が一番上がるか?

- ・ 意見出しから出た手段を評価するための軸を選定、評価

結論付け

女子の多いバイトを始める/街コンに参加する



① ②に興味に課題  
⇒ 学部に①出会いないし  
⇒ ②外見・内面磨きがおざなりに  
⇒ ステップ③に上がれない

## 評価軸の決定

○:2点 △:1点 ×:0点	転部 する	サークル 始める	バイト 始める (資金力)	街コンに 参加する	アプリを 始める	清潔感を 意識する	服装 改善	コミュニ カ 上げる
コスト	×	○	○	△	△	○	△	○
面倒くささ	×	△	△	△	○	△	△	×
期間	×	△	△	○	△	△	△	×
実現可能性	×	△	○	○	○	○	○	△
効果	○	△	○	○	△	△	△	○
合計	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>5</b>

結論: バイトを始める or 街コンに参加する

## 前提条件の確認

GaN系パワーデバイスを普及させるためには？  
(何を、いつまでに、誰に売るのか？)



お題が抽象的です。前提条件の確認で具体的なお題に置き換える必要があります。  
(そもそもなぜGaN系パワーデバイスを普及させる必要がありますか？)



その上で、どのようなアウトプットを出しますか？  
(どのようなデバイスを開発するか？/何年でそれを実現するか？/売る市場はどこか？)

## 意見出し

GaN系パワーデバイスを普及させる手段を網羅的に書き出し、課題を抽出します。

## 評価軸の決定

評価軸を決めます。  
競争によって利益が減っているため、必須になる軸がありそうです。