

研究室と社会をつなぐあいちシンクロtron光センター

名古屋大学 天野 浩

1980年代 日本の大学の貧乏研究室から生まれたGaN青色LED



故赤崎勇先生



@名大赤崎記念館

2/41

GaNを用いたLED電球 電力を使えない世界15億人に明かりを提供



太陽電池 ハネル 衛星アンテナ
モンゴル ゲル

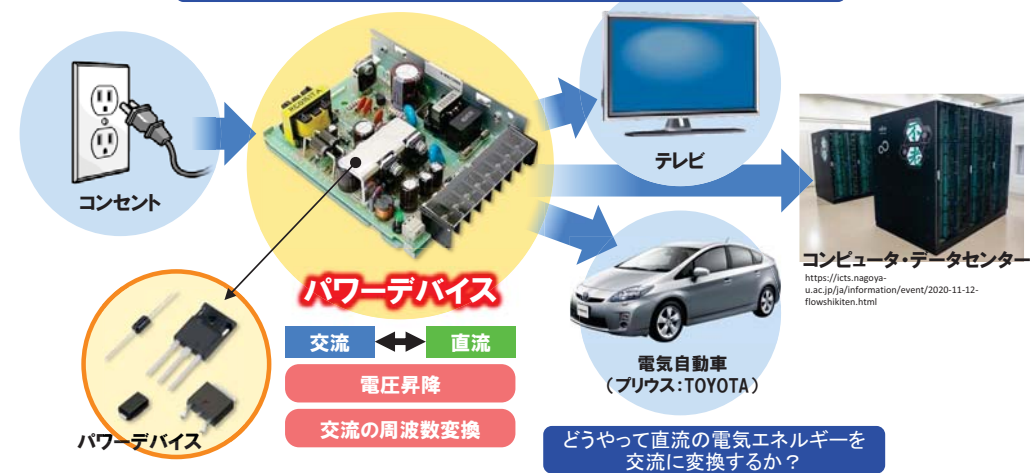
2015年2月 ガントムル
モンゴル教育科学大臣

2020年 LED関連市場:5兆7千億円(世界) 省エネルギー効果:7% (=1兆円(国内))

3/41

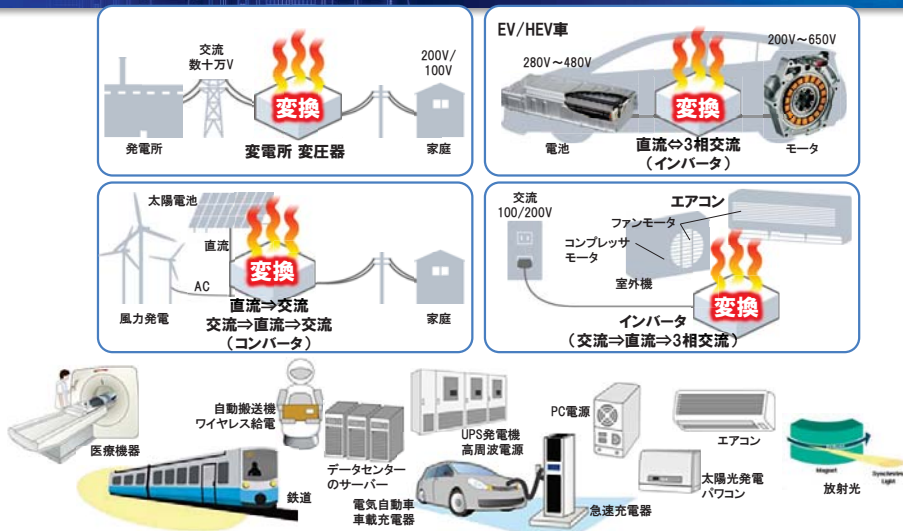
次の社会貢献はパワーデバイス

全ての電化製品中の電源回路に用いられるパワーデバイス



4/41

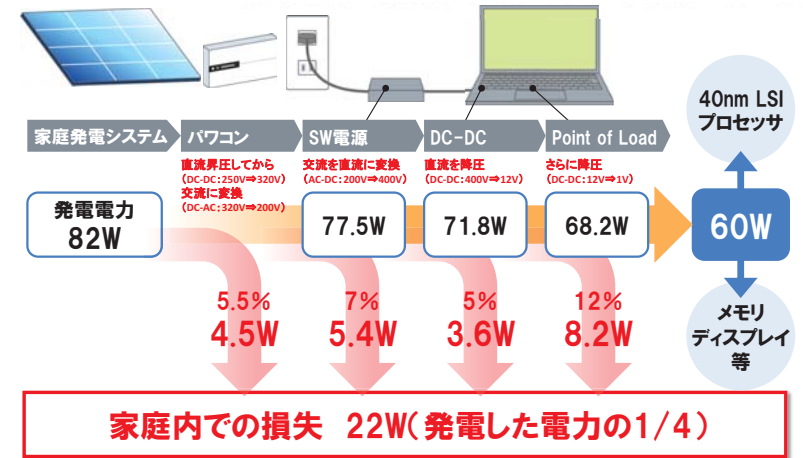
電気を使うとエネルギー損失は必ず発生する



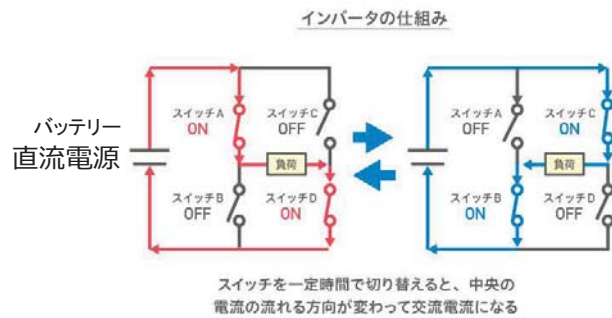
例：太陽光発電でパソコンを動かすまでの電気エネルギーの流れ

大阪大学森勇介教授ご提供

パワーデバイスで4回も電気を変換 変換する度にエネルギーが損失

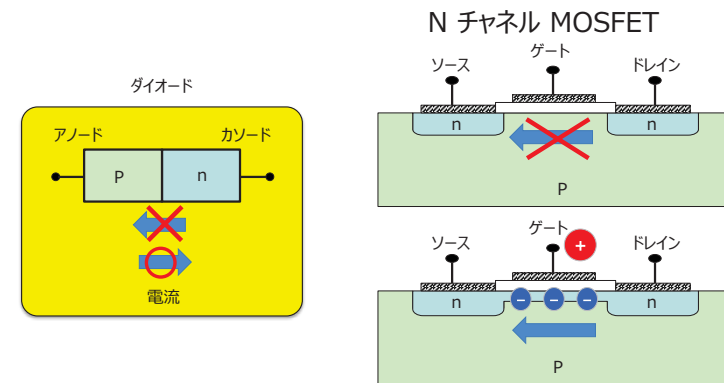


スイッチのオンオフで直流を交流に変換する仕組み



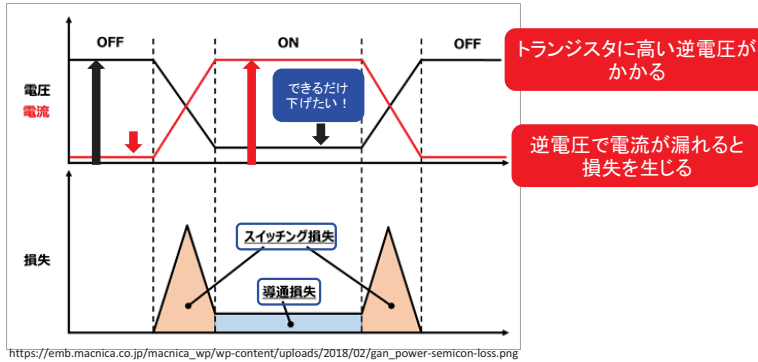
https://staff.persol-xtech.co.jp/hatalabo/wp-content/uploads/2018/10/mono437_02.jpg

トランジスタをスイッチにする仕組み



トランジスタ導通時(ONの時)の損失とスイッチング時の損失およびオフ時の損失

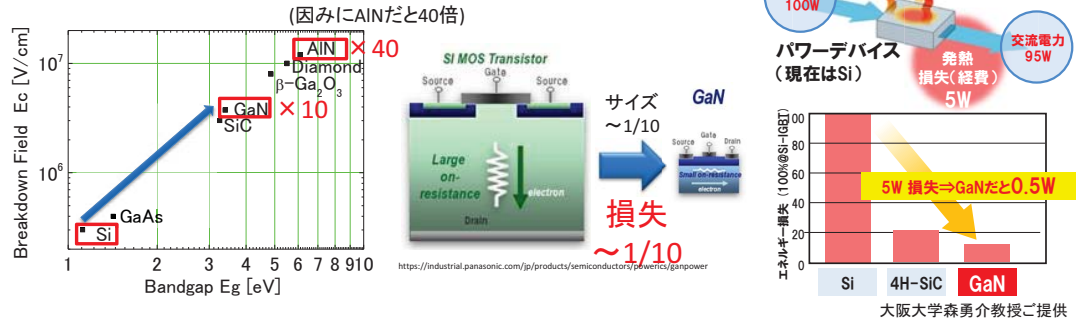
電力(単位W) = 電圧(V) × 電流(A)



スイッチング損失は、スイッチのタイミングを調整すればゼロにできる。
導通損失は半導体の絶縁破壊電界(とデバイスの構造)で決まる。

何故GaNは期待されるのか? 低導通損失

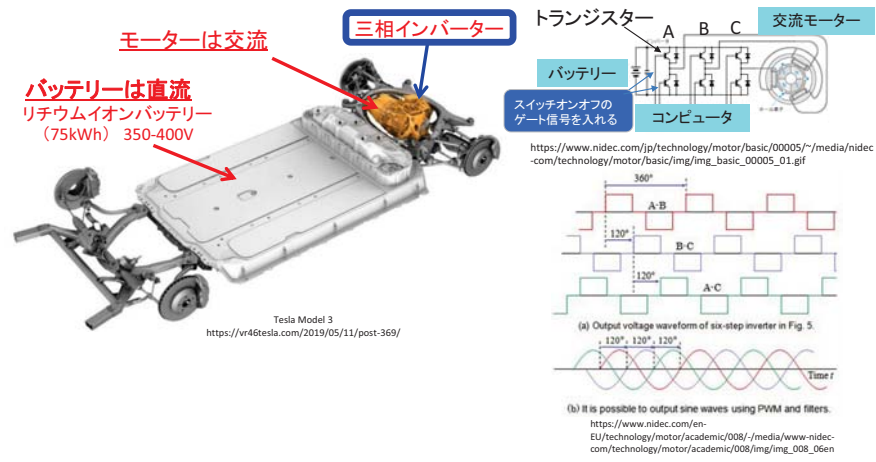
絶縁破壊電界がSiの10倍高い



1000 Vのオンオフのために、Siは厚さ30 μm 必要だが、GaNは3 μm で大丈夫!

電気自動車の仕組み バッテリー: 直流 \rightarrow インバータ \rightarrow モーター: 交流

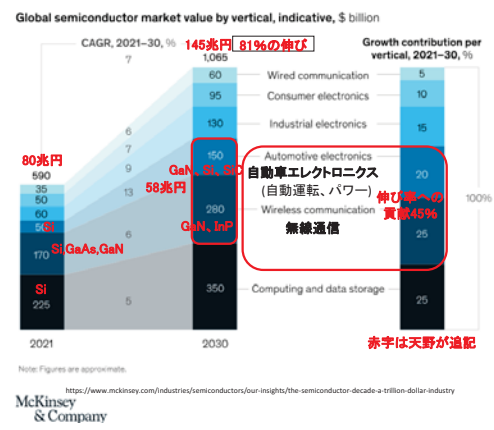
トランジスタはコンピュータからのゲート信号でオンオフできる
三相インバータ回路



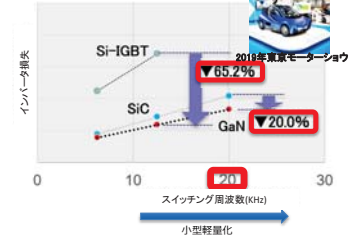
McKinsey&Companyが示す2030年までの半導体マーケットとGaNへの期待

2030年のGaN市場ターゲットは最大58兆円/年!

電気自動車の性能はモーターとインバータで決まる



インバータの損失比較 Siに較べて65%損失低減!



環境省: 未来のあるべき社会・ライフスタイルを創造する技術イノベーション事業
高品質GaN基板を用いた超高性能GaNパワー・光デバイスの技術開発とその実証

GaNの特徴 超小型軽量化 ただし今のパワーGaNは問題あり！



<https://www.sedi.co.jp/data.jsp?version=&database=wireless&id=6684&class=01010100>
<https://wimax-broad.jp/column/5g-base-station/>
https://www.tti.co.jp/nt/press_release/p150227/p150227.htm
<https://pr.fujitsu.com/jp/news/2015/12/9.html>

GaN結晶品質の水準・・・第一世代(放射光で評価できない)

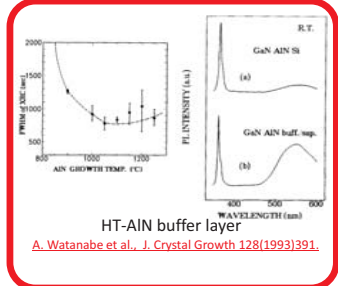
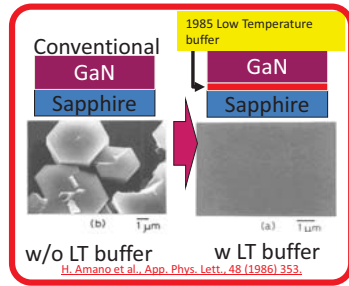
Si上のGaN

ACアダプタ
小電力用に限られる

1. 第一世代: サファイア、Si、SiC上のGaN

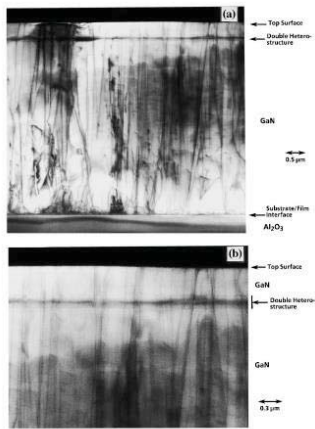
10億個
欠陥密度: $10^9/cm^2$

CREE, Efficient Power Conversion Corporation, Transphorm(Fujitsu), GaN Systems, Infineon Technologies AG, NXP Semiconductors, Qorvo, Texas Instruments Incorporated, Toshiba Corporation, Rohm, Navitas Semiconductor, etc.



サファイア基板上も Si基板上も名大が初

青色LEDの社会実装に貢献した低温バッファ層技術・・・ただし結晶は欠陥だらけ



転位密度は $> 10^9/cm^2$

S. D. Lester et al., *Appl. Phys. Lett.*, 66 (1995) 1249.

透過電子顕微鏡でないと、評価できない

FIG. 3. Bright-field two-beam TEM micrographs showing the defect distribution along the device. (a) Cross section of full thickness of device, (b) top region of device including the double heterostructure active region. The dislocation density is in the range $2-10 \times 10^9$ dislocations/cm².

GaN結晶品質の水準・・・第二世代(まだ放射光で評価出来ない)

Si上のGaN

ACアダプタ
小電力用に限られる

1. 第一世代: サファイア、Si、SiC上のGaN

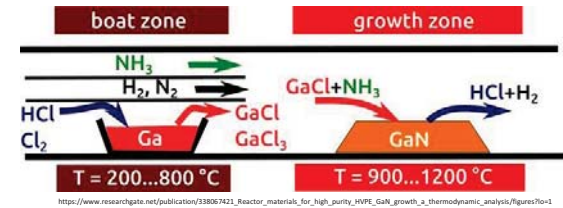
10億個
欠陥密度: $10^9/cm^2$

CREE, Efficient Power Conversion Corporation, Transphorm(Fujitsu), GaN Systems, Infineon Technologies AG, NXP Semiconductors, Qorvo, Texas Instruments Incorporated, Toshiba Corporation, Rohm, Navitas Semiconductor, etc.

2. 第二世代: (気相からの結晶成長)HVPE-GaN上のGaN

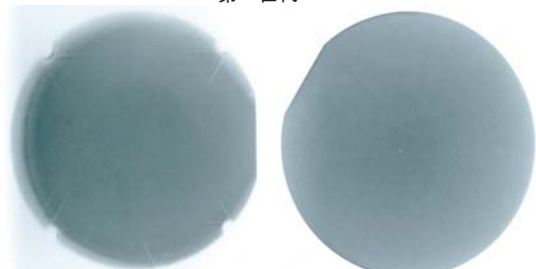
100万個
欠陥密度: $10^6/cm^2$

Nichia Chemicals, SONY, Panasonic, SEI, etc.
NexgenPowerSystems, Odysseys



Si上もサファイア上も転位が多すぎてX線トポでは評価できない！

第一世代



GaN/AlN/Si (111)
転位密度 > 10⁹ cm⁻²

GaN/AlN/Sap. (0001)
転位密度: 10⁹ cm⁻²

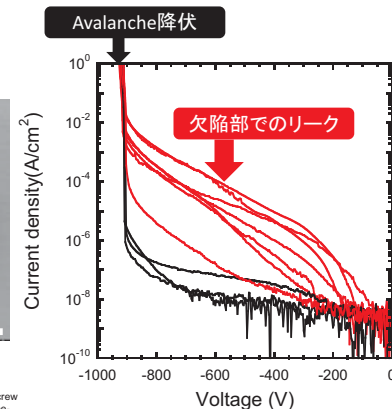
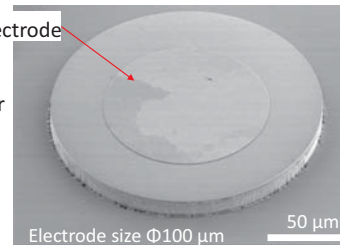
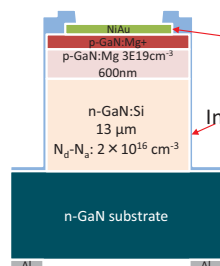
- X-ray : Cu, 50kV, 40mA, 0.4mm × 0.8mm focus
- X-ray source to sample distance : 1200 mm
- Sample to film distance : 35mm
- Diffraction Vector: 114 20=100° Incident angle=10°

リガク菊池哲夫氏
ご提供

高電圧印加時のリーク電流の起源

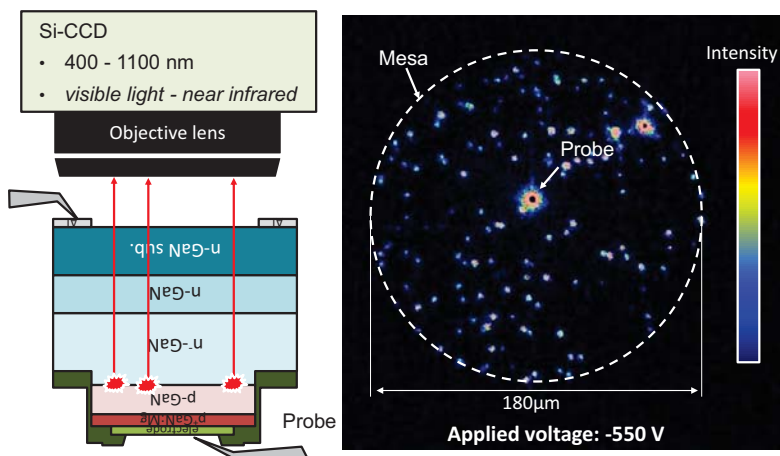


宇佐美茂佳: 名大博士論文
(現在は阪大助教)



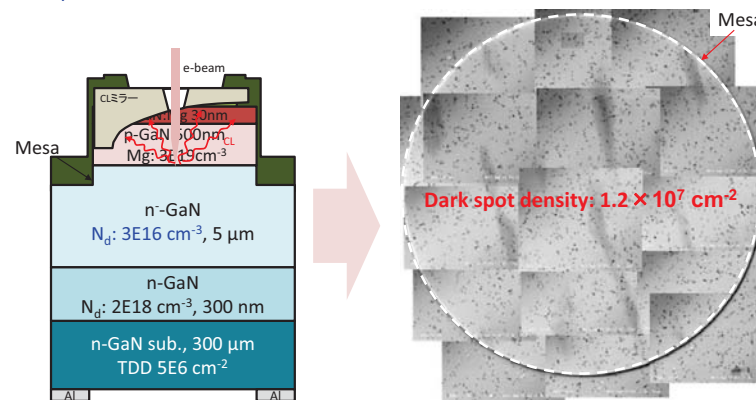
S. Usami, A. Tanaka, H. Fukushima, Y. Ando, M. Deki, S. Nitta, Y. Honda, and H. Amano, "Correlation between nanopipes formed from screw dislocations during homoepitaxial growth by metal-organic vapor-phase epitaxy and reverse leakage current in vertical p-n diodes on a free-standing GaN substrates", Jpn. J. Appl. Phys., 58, SCCB24 (2019).
S. Usami, N. Mayama, K. Toda, A. Tanaka, M. Deki, S. Nitta, Y. Honda, and H. Amano, "Direct evidence of Mg diffusion through threading mixed dislocations in GaN p-n diodes and its effect on reverse leakage current", Appl. Phys. Lett., 114, 232105 (2019).

リーク箇所はエミッション顕微鏡で確認可能



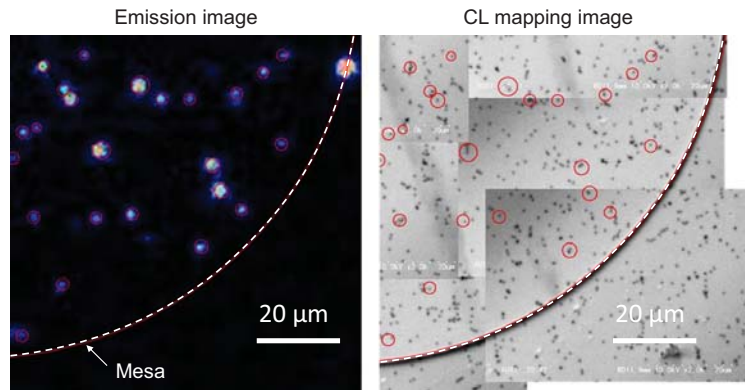
カソードルミネッセンス(Cathodoluminescence:CL)による破壊検査

- p層はエッチングにより除去



Dark spots = threading dislocations

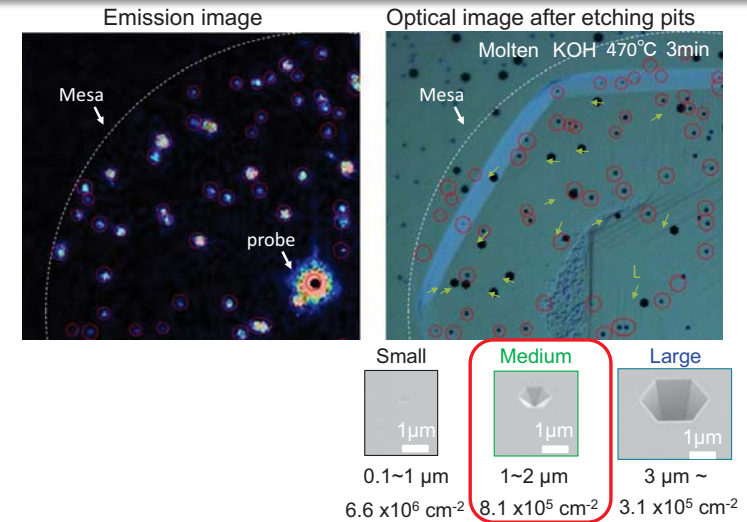
エミッション顕微鏡によるリーク箇所とCLによる暗点箇所の比較



全ての暗点(貫通転位)でリークしているわけではない

21/41

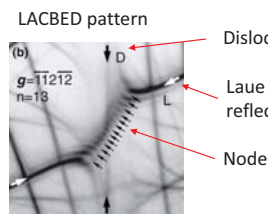
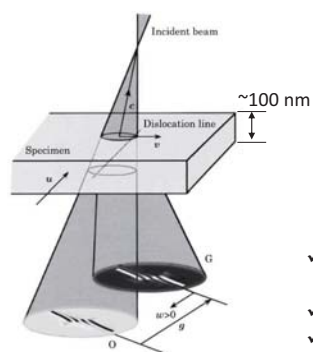
エミッション顕微鏡によるリーク箇所と化学エッチングによるエッチピットの比較



22/41

Mediumサイズピットの起源

Large angle convergent-beam electron diffraction (LACBED) ◆ Obtained simultaneous equation



- $-6w = -6$
- $u + v - 2t - 6w = -6$
- $2u + v - 3t + 5w = 5$
- $t + u + v = 0$

$$\therefore \mathbf{b} = [0001]$$

Medium pit was $\mathbf{b} = [0001]$

らせん転位

- ✓ Intersection of L and D \Rightarrow node n appeared
- ✓ $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = n$ is satisfied
- ✓ Get n with different \mathbf{g} condition

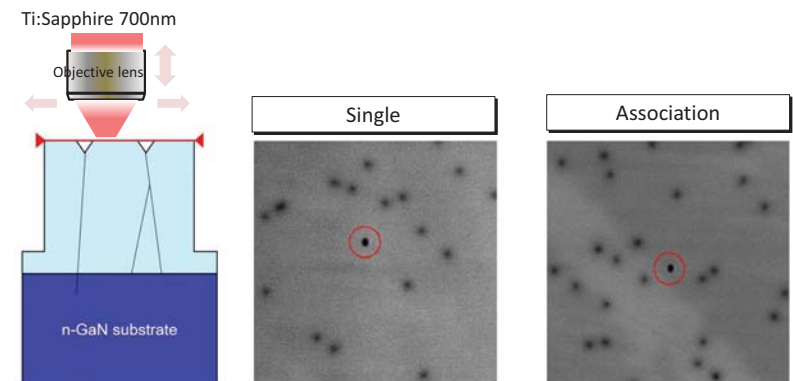
\mathbf{g} : reciprocal lattice vector, \mathbf{b} : Burgers vector

津田, 日本顕微鏡学会会報, Vol. 44, No.4 (2009)

23/41

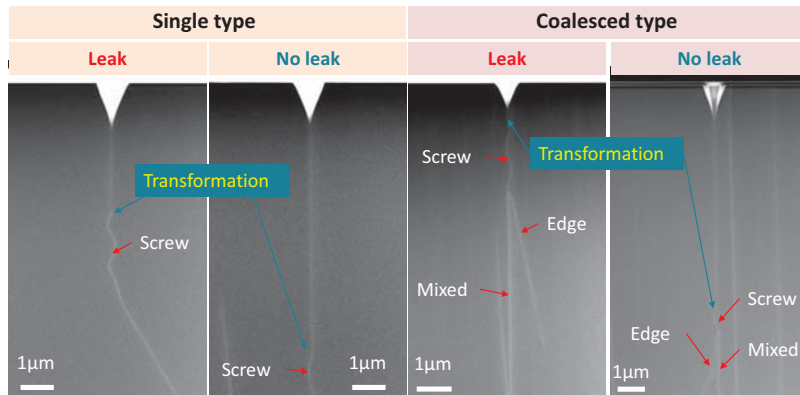
リークするらせん転位とリークしないらせん転位 多光子PLによる評価

cf. GaNの吸収端は350nm



24/41

HAADF-STEMによる評価



結局、リークする・しないの違いは分からなかった

GaN結晶品質の水準・・・第三世代(あいちシンクロトロンで評価できる)

Si上のGaN



小電力用に限られる

1. 第一世代: サファイア、Si、SiC上のGaN

CREE, Efficient Power Conversion Corporation, Transphorm(Fujitsu), GaN Systems, Infineon Technologies AG, NXP Semiconductors, Qorvo, Texas Instruments Incorporated, Toshiba Corporation, Rohm, Navitas Semiconductor, etc.

10億個
欠陥密度: $10^9/cm^2$

2. 第二世代: (気相からの結晶成長)HVPE-GaN上のGaN

Nichia Chemicals, SONY, Panasonic, SEI, etc.
NexgenPowerSystems

100万個
欠陥密度: $10^6/cm^2$

3. 第三世代: 低転位GaN基板上的GaN

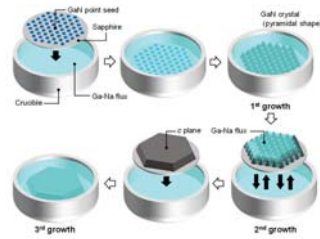
基板成長技術: Na flux, SCAAT™-LP **いずれも日本発!!**

1万個未満(キラ欠陥は100個以下)

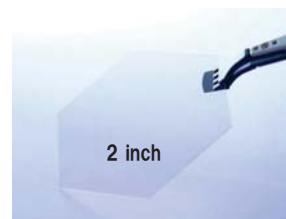
欠陥密度: $<10^4/cm^2$

(欠陥の一部は、電流が漏れたり局所的な破壊を引き起こす)
Na flux, SCAAT™-LP(いずれも液相からの結晶成長で、欠陥を生じにくい)

GaN基板技術 その1 Na flux method (大阪大学、豊田合成)



製造装置(豊田合成提供)



https://www.toyoda-gosei.com/news/detail/?id=306

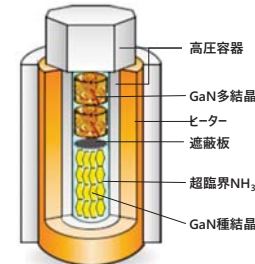
大阪大学森勇介教授提供

GaN基板技術 その2 アモノサルマル法(東北大学、三菱ケミカル、日本製鋼所、名古屋大学)

アモノサルマル法原理

- 圧力容器内で温度と圧力を上げることでアンモニアが超臨界状態となる
- 超臨界状態のアンモニア中にGaN多結晶を溶解させ、GaN種結晶上に再析出させる
- 大型の圧力容器を用いることで、一度に多数の結晶を得ることが可能

SCAAT™-LP*の模式図
(*三菱ケミカルと日本製鋼所が行うアモノサルマル法の登録商標)



水熱合成法の例

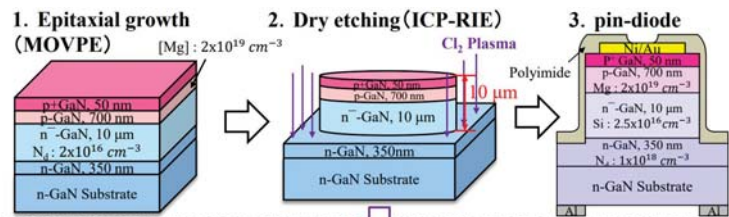
- アンモニアの代わりに水、GaNの代わりにSiO₂を用いる手法が、水熱法による人工水晶の結晶育成
- 水熱法では低コストな大型人工水晶の大量生産を実現している

GaNで人工水晶と同じことを実現させる!

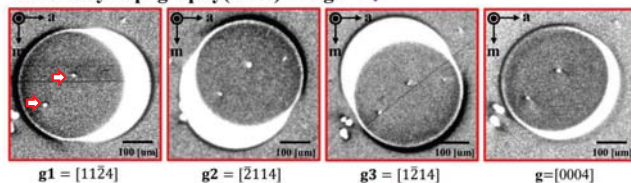


人工水晶取り出し作業
(株) 日本製鋼所提供

漸くあいちシンクロトロンで評価していただけるようになったGaN結晶



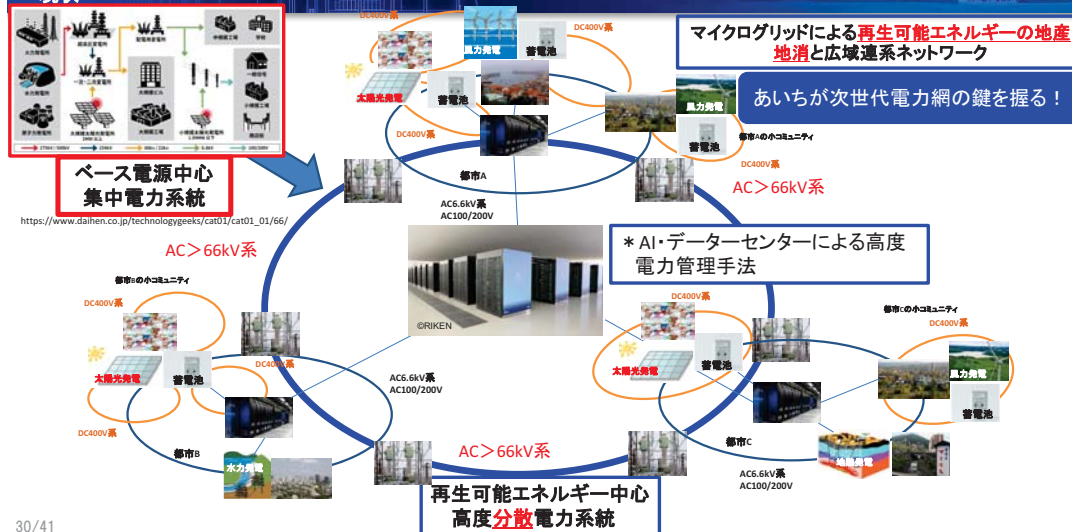
2.1 X-Ray Topography(XRT) Image



Waana KWON

29/41

(2030~)次世代マイクログリッド電力網実現の鍵を握る窒化物パワーデバイス



30/41

あいちシンクロトロン光センターへの期待・・・6インチ 8インチウエハの評価

C-TEFsクリーンルーム



- 縦型および横型デバイス、レーザダイオード試作ライン順調に稼働
- GaN on GaN 研究開発では世界唯一の拠点
 - 1000平米の大面積本格クリーンルーム
 - 最新の結晶成長装置、評価分析装置、デバイス作製装置を集積
 - 専任技術者(CR経験者)による企業研究所レベルの設備・運用
 - 名大で開発した技術・ノウハウを活用可能 = 世界唯一のプロセスを提供
- パワー・高周波デバイスユーザー企業のテストサンプル試作(PoCレベル)可能

現状、2インチ・4インチの試作可能

⇒2030年に向けての社会実装には6・8インチライン(装置開発への投資)が必要

31/41

人とローカルサーバーをつなぐ次世代インターフェース

PCディスプレイ=固定



スマートフォン=可動



眼鏡型ディスプレイ=可動

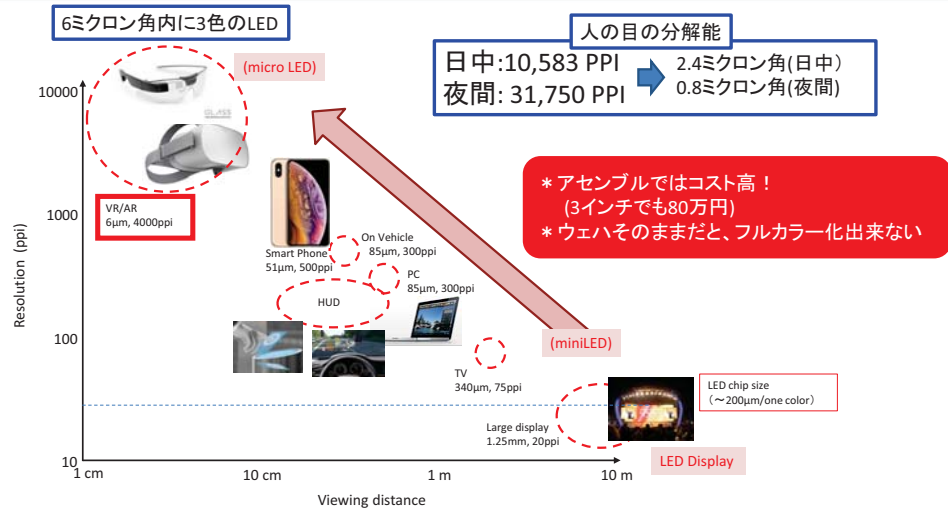


しかし、手が不自由

手も自由

32/41

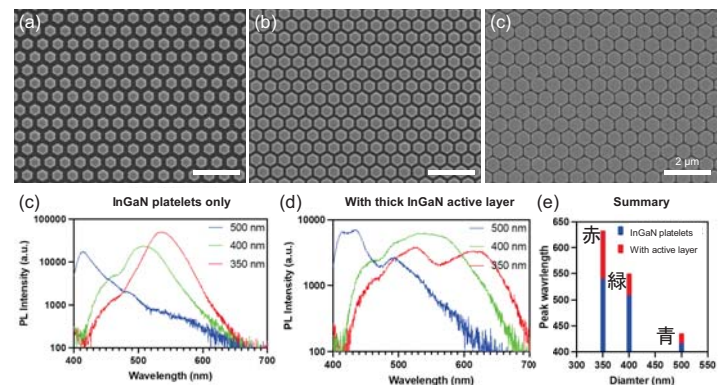
眼鏡型ディスプレイに必要な指標 Pixel Per Inch : PPI



1回の結晶成長でサブミクロン内に3色LEDを自在に作り込む技術

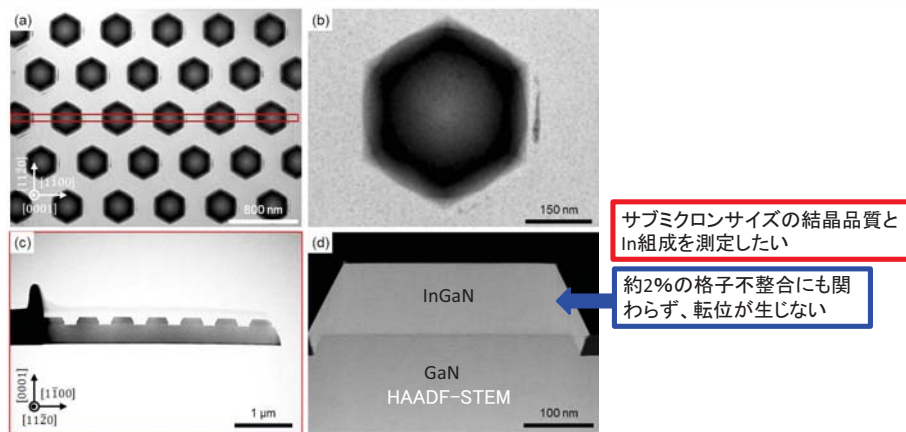


Wentao Cai
Doctor Thesis



W. Cai, Y. Furusawa, J. Wang, J-H Park, Y. Liao, H-J Cheong, S. Nitta, Y. Honda, M. Pristovsek, and H. Amano, "High In content nitride asub-micrometer platelet arrays for long wavelength optical applications", Appl. Phys. Lett., 121, 211105 (2022).
 W. Cai, J. Wang, J-H Park, Y. Furusawa, H. Cheong, S. Nitta, Y. Honda, M. Pristovsek, and H. Amano, "Red emission from InGaN active layer grown on nanoscale InGaN pseudosubstrates", Jpn. J. Appl. Phys., 62, 020902 (2023).

あいちシンクロトロン光センターへの期待



あいちシンクロトロンの次の10年に向けてのお願い

- * 2030年以降の数兆円/年規模の産業の核であるGaNパワー・高周波・ディスプレイデバイスの社会実装には、ウェハ評価が必須。
- * その実現には、あいちシンクロトロンの更なる整備(サブミクロンビーム、大面積ビーム)が不可欠。
- * あいちシンクロトロンの益々の発展・整備を是非お願いいたします!

