

半極性バルクGaN基板上へのLEDの開発 — 実用レベルの発光効率と面内偏光の実現 —

船戸充 講師, 川上養一 助教授, 上田雅也 (D1)
京都大学・工学研究科・電子工学専攻

成川幸男, 小杉卓生, 高橋正良, 向井孝志
日亜化学工業株式会社

謝辞：京都ナノテク事業創造クラスター

背景

➤ III族窒化物半導体：AlN, GaN, InN

- 紫外域（AlN）から可視域（GaN）を通過して赤外域（InN）までをカバー

- InGaN

 - III族混晶組成比によってバンドギャップが近紫外（GaN：3.4 eV）から赤外（InN：0.7eV）まで変化

 - 可視域をカバー可能・・・InGaNを発光層に用いたLED, LDが実用化

➤ 実用化されたデバイス

- LED・・・紫外から緑 → LED フルカラー

 - ディスプレイ

- LD・・・紫外から青 → Blu-ray Disc, PS



今回の開発の特徴

▶ 発光効率の改善の可能性

原理的には内部量子効率(=注入キャリアのうち光生成に寄与するキャリアの割合)を100%に近づけることが可能

(従来品では、70%程度といわれている)

▶ 面内偏光特性を持つ

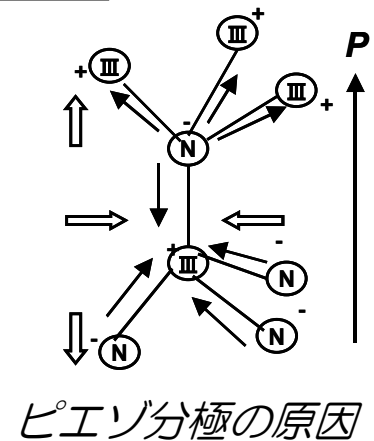
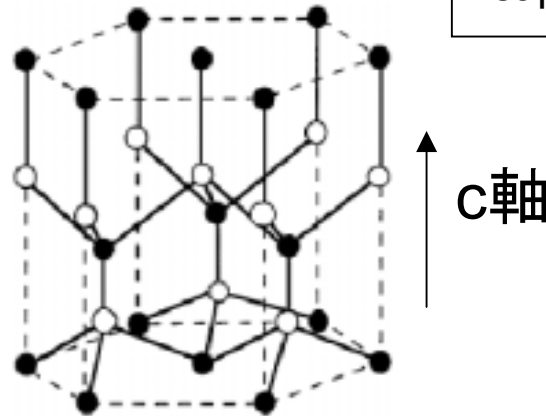
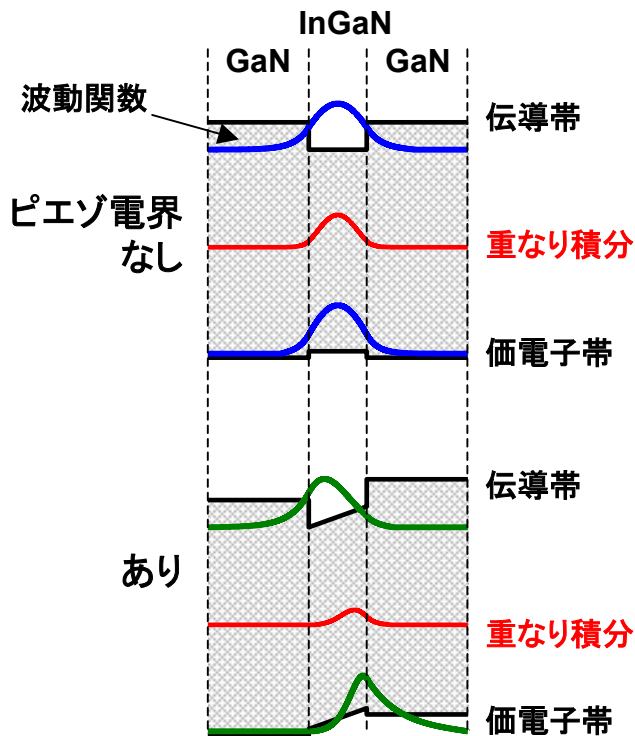
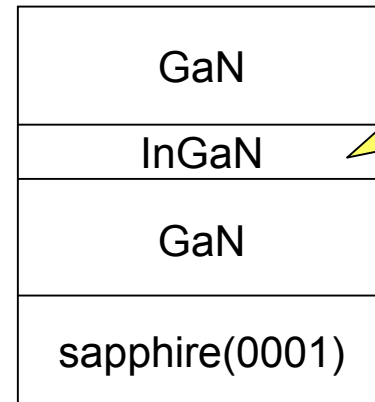
液晶など光のスイッチを利用した装置の効率改善

発光効率に関して1

▶ 従来の発光素子構造：

c軸配向した歪み量子井戸構造

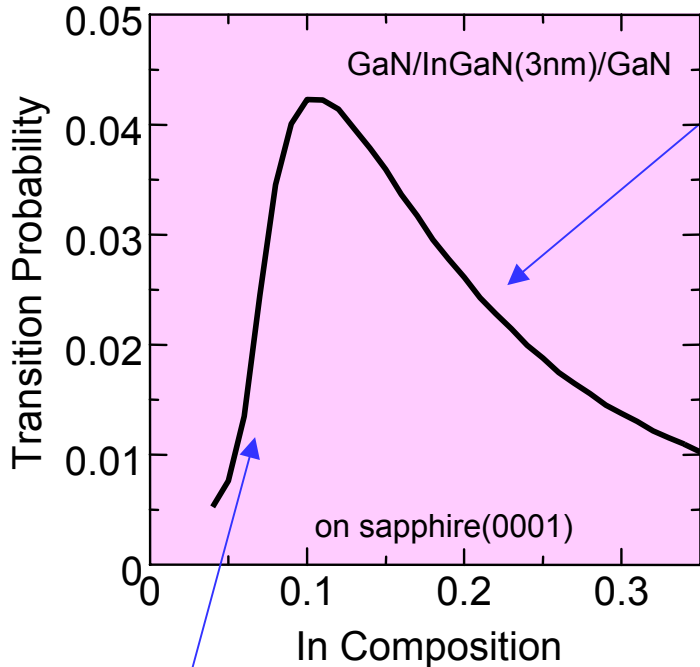
格子不整合 (GaN/AlN 2%, GaN/InN 11%)
 ⇒ 歪 ⇒ ピエゾ電界
 ⇒ 再結合確率の低下



- 電界：増加 ⇒ 電子・正孔の重なり減少
- それに比例する再結合確率も減少 ⇒ 光りにくい

発光効率に関して2

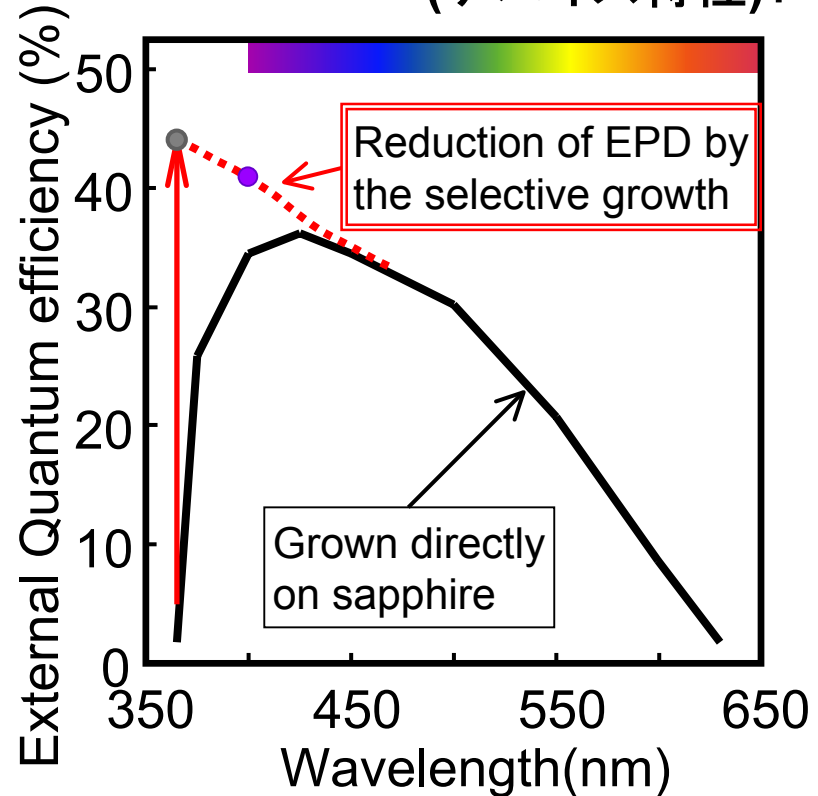
理論的検討



ピエゾ分極による
再結合確率低下

閉じ込めの増大による
再結合確率の増大

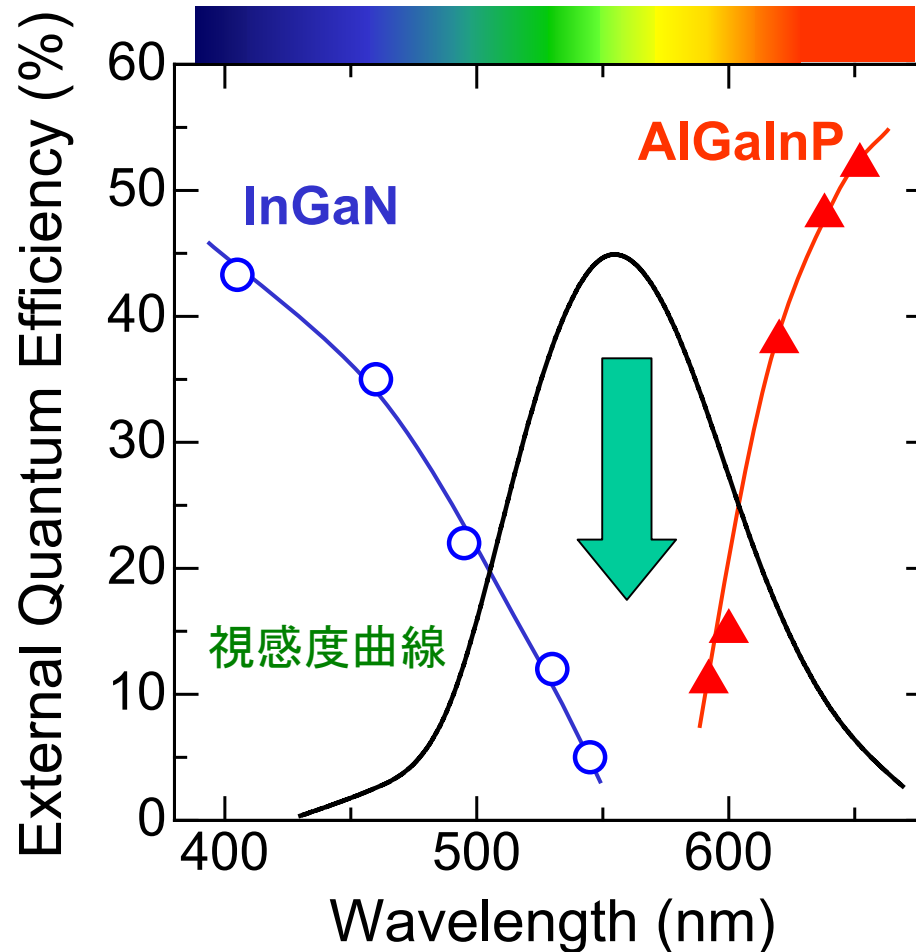
その結果 (デバイス特性):



少 ← In組成 → 多

発光効率に関して3

- ▶ 他の材料系 (AlGaInP系：赤) も合わせてみると...

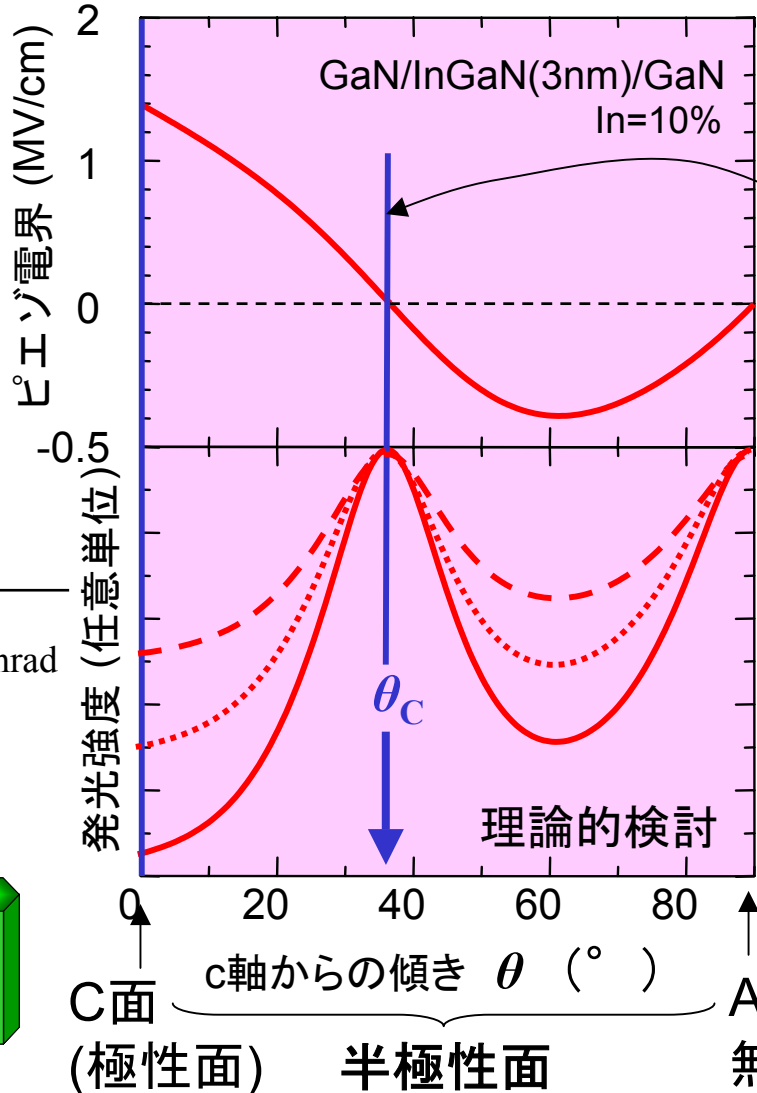
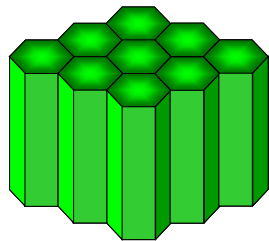


- ▶ **グリーンギャップ** InGaN系LEDの発光効率向上の必要性

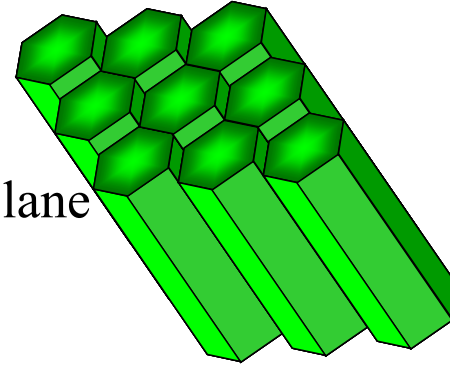
発光効率に関して4

傾斜GaNによる発光効率の向上：発光効率の傾斜角依存性

$$\eta_{\text{int}} = \frac{1}{1 + \tau_{\text{rad}} / \tau_{\text{nonrad}}}$$

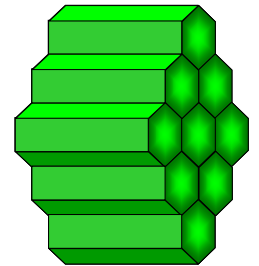


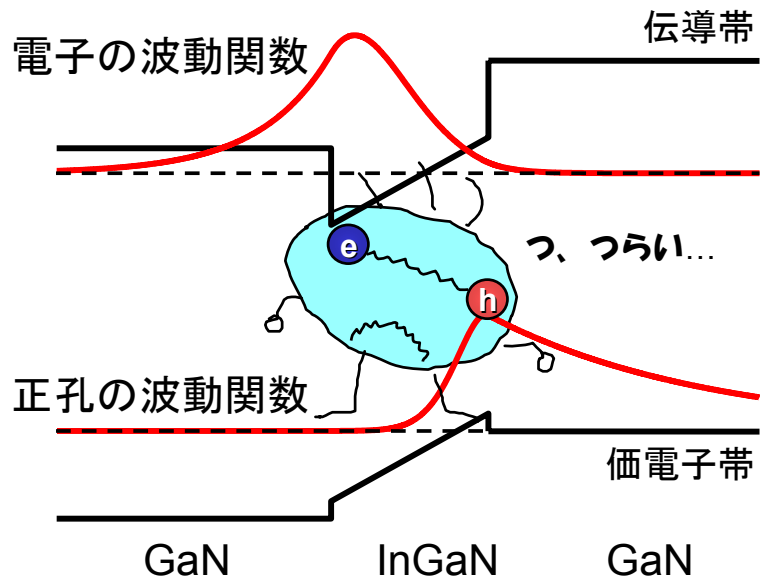
六角柱を傾けると…
電界がゼロになり、効率が高くなる傾き θ_c が存在する



$\theta_c = 39^\circ$: Takeuchi, et al.: *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, 413-416 (2000).

$\theta_c = 55^\circ$: Park, S-H. : *J. Appl. Phys.* **91**, 9904-9908 (2002).



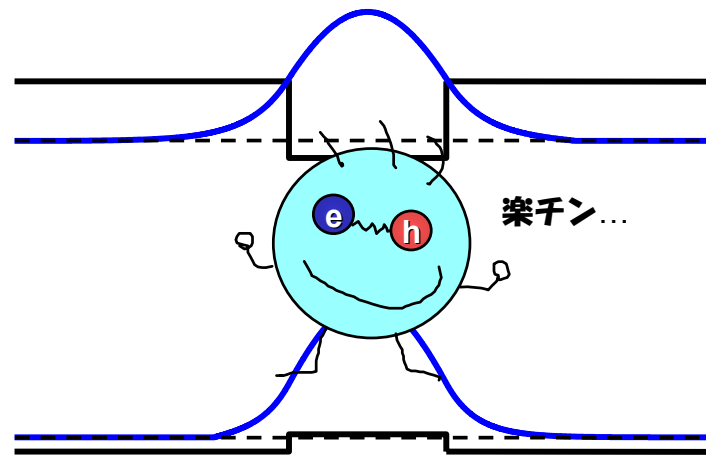


極性面

発光遷移確率が低い



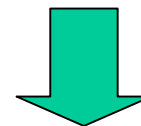
発光効率低下の要因



半極性面

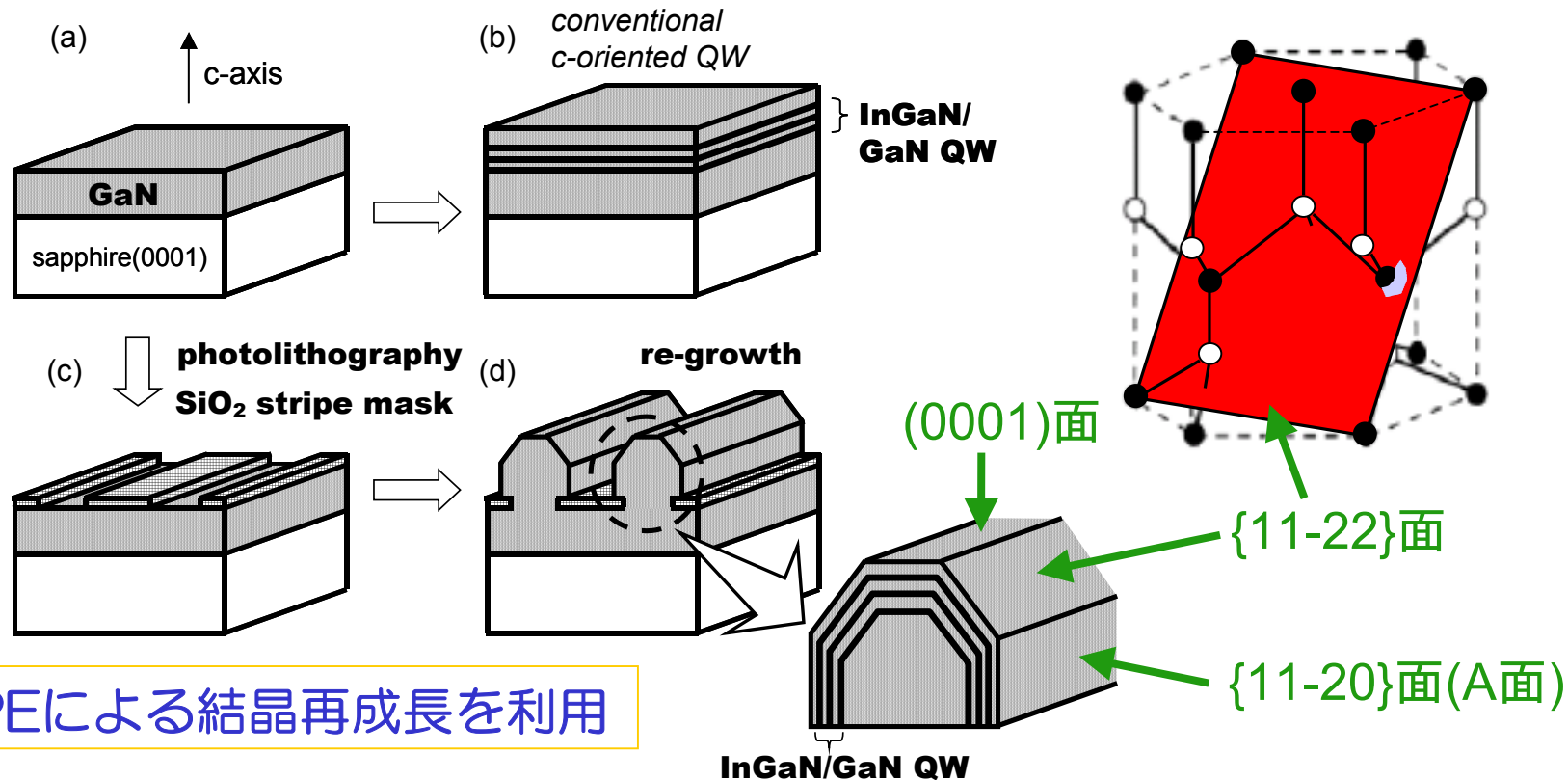
発光遷移確率が高い

高品質の結晶成長が可能



発光効率を高くできる

傾斜GaNの作製(本研究グループの提案)



MOVPEによる結晶再成長を利用

- ▶ 傾斜 $\{11\bar{2}2\}$ 面・側面を利用した発光効率の向上を確認
- ▶ 各結晶面における異なる発光色 \Rightarrow 多色化

K. Nishizuka, M. Funato, Y. Kawakami, Y. Narukawa, T. Mukai, and S. Fujita, *Applied Physics Letters*, Vol. 85, pp.3122-3124 (2004).

K. Nishizuka, M. Funato, Y. Kawakami, Y. Narukawa, and T. Mukai, *Applied Physics Letters*, Vol. 87, 231901/1-3 (2005).

➤ マイクロファセット ⇒ 現行のデバイスプロセスの適用難
⇒ 傾斜したGaNを平面的に作る

1. 半極性面 $(10\bar{1}\bar{3})$, $(10\bar{1}\bar{1})$

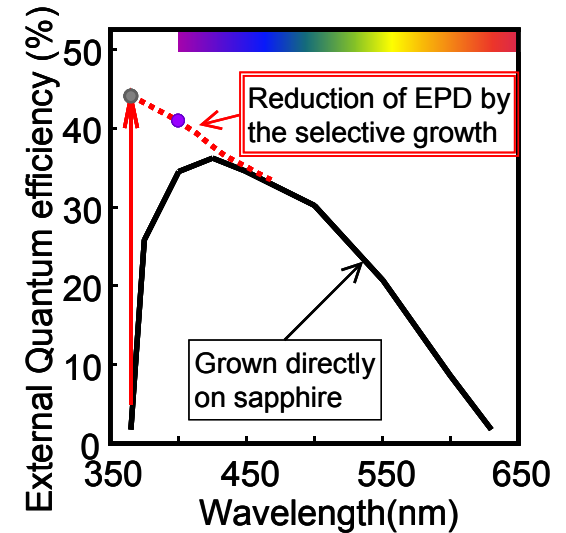
University of California, SB, 中村教授グループ
MgAl₂O₄ 基板を利用

青色LED, 外部量子効率 **0.41%**

[*Jpn. J. Appl. Phys.* **42**, L1039 (2005).]

緑色LED, 最大外部量子効率 **0.052%**

[*Appl. Phys. Lett.* **87**, 231110 (2005).]



側面=無極性面は結晶成長が難しく高効率デバイスの実現に至っていない

2. 無極性 A面GaN on r-sapphire H. M. Ng. *Appl. Phys. Lett.* **80**, 4369 (2002).

3. 無極性 M面GaN on LiAlO₂ (100) P. Weltereit, et al. *Nature* **406**, 865-868 (2000).

本研究:

半極性{11-22}面バルクGaN基板上へのLED作製
(HVPE成長C面GaNから切り出し&CMP)

今回の開発の特徴

▶ 発光効率の改善の可能性

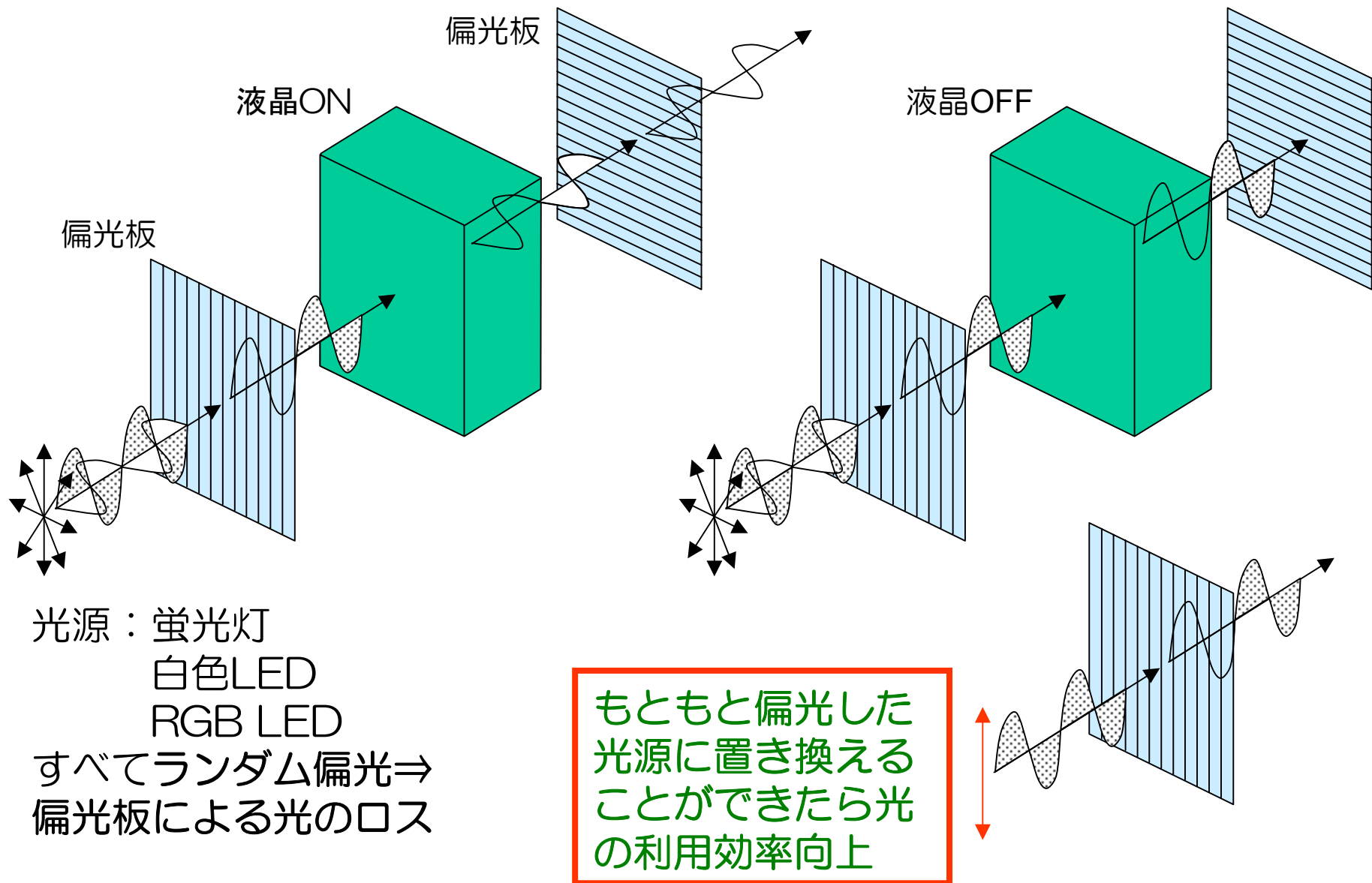
原理的には内部量子効率(=注入キャリアのうち光生成に寄与するキャリアの割合)を100%に近づけることが可能

(従来品では、70%程度といわれている)

▶ 面内偏光特性を持つ

液晶など光のスイッチを利用した装置の効率改善

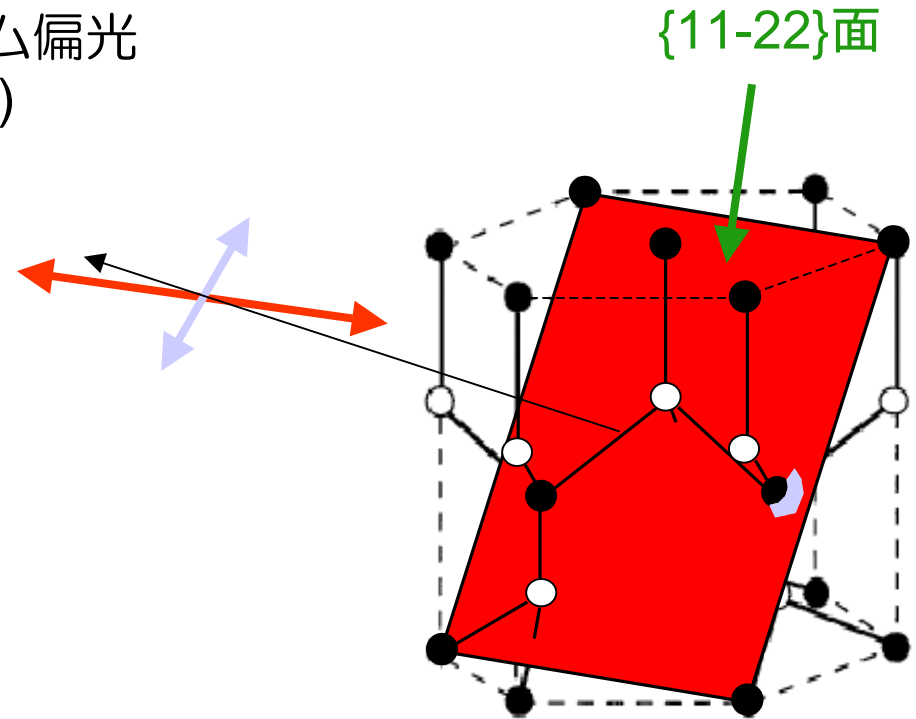
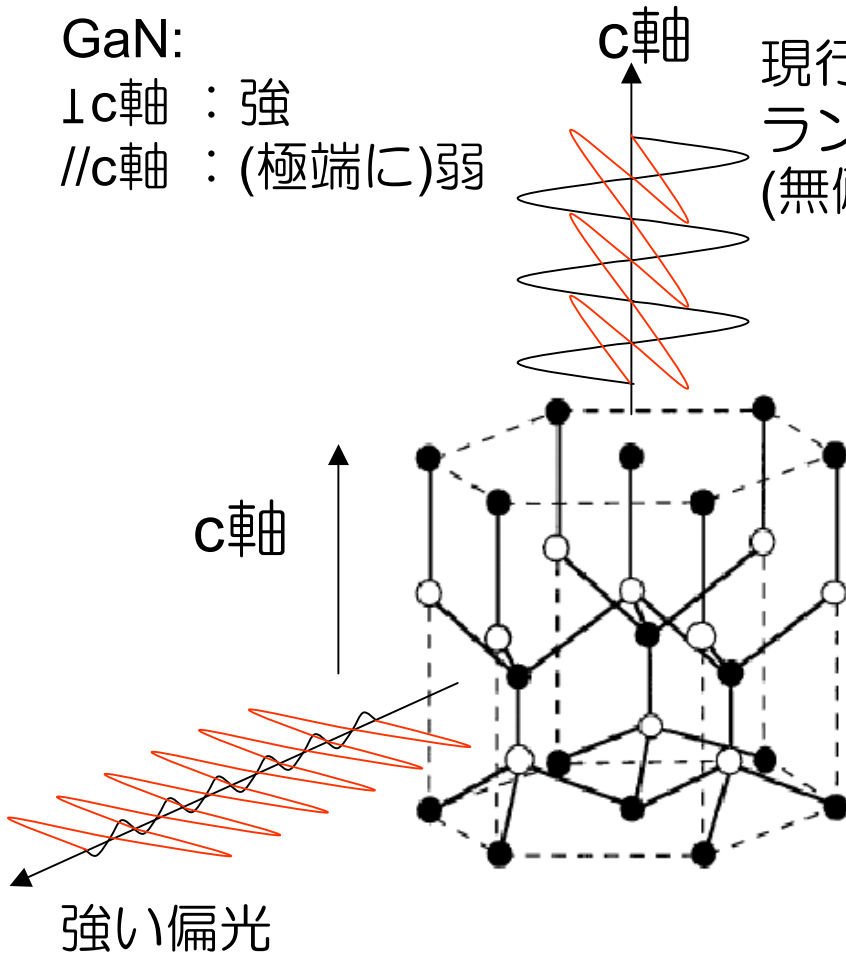
偏光を利用したデバイス：液晶ディスプレイ



半極性面上での偏光

GaN:
⊥c軸 : 強
//c軸 : (極端に)弱

現行LED :
ランダム偏光
(無偏光)



強い偏光が期待!

理論的には, 4 : 1.

液晶に使うと, 偏光板でのロス
が減り**約50%の省エネ**

{11-22}GaN基板上での成長条件の確立(京大)

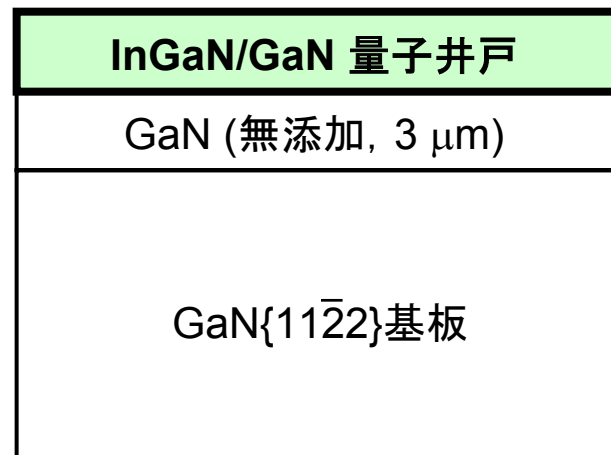
有機金属気相成長 (MOVPE)

量産性, 界面, 組成の制御性に優れ, III族窒化物の結晶成長法として一般に用いられている

GaNの成長条件の確立



InGaN(3nm)/GaN(10nm) 5周期の量子井戸の成長条件の確立

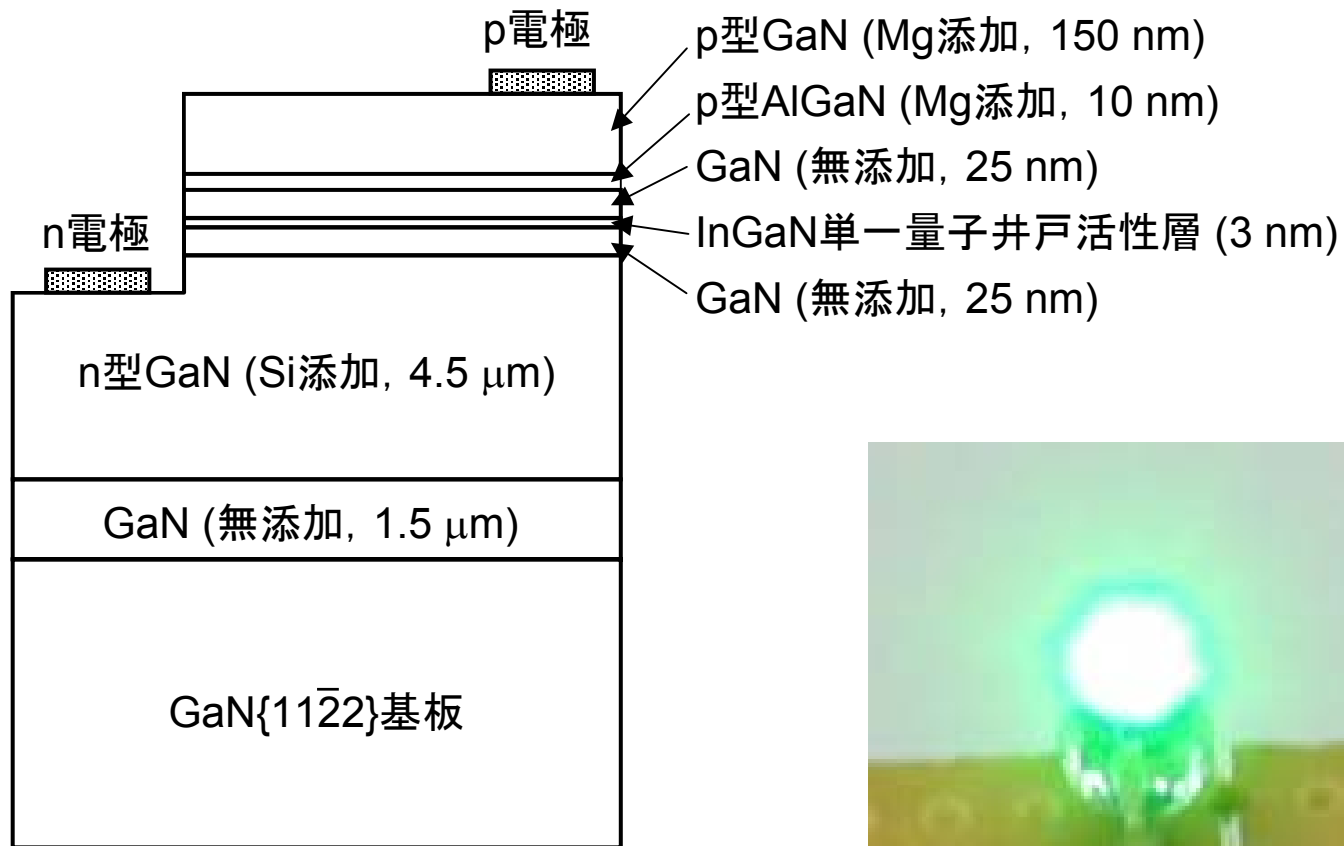


(0001)面とは異なる最適成長条件

第 67 回応用物理学会学術講演会発表予定。2006年8月29日～9月1日 立命館大学

LED構造の試作(日亜)と発光の様子

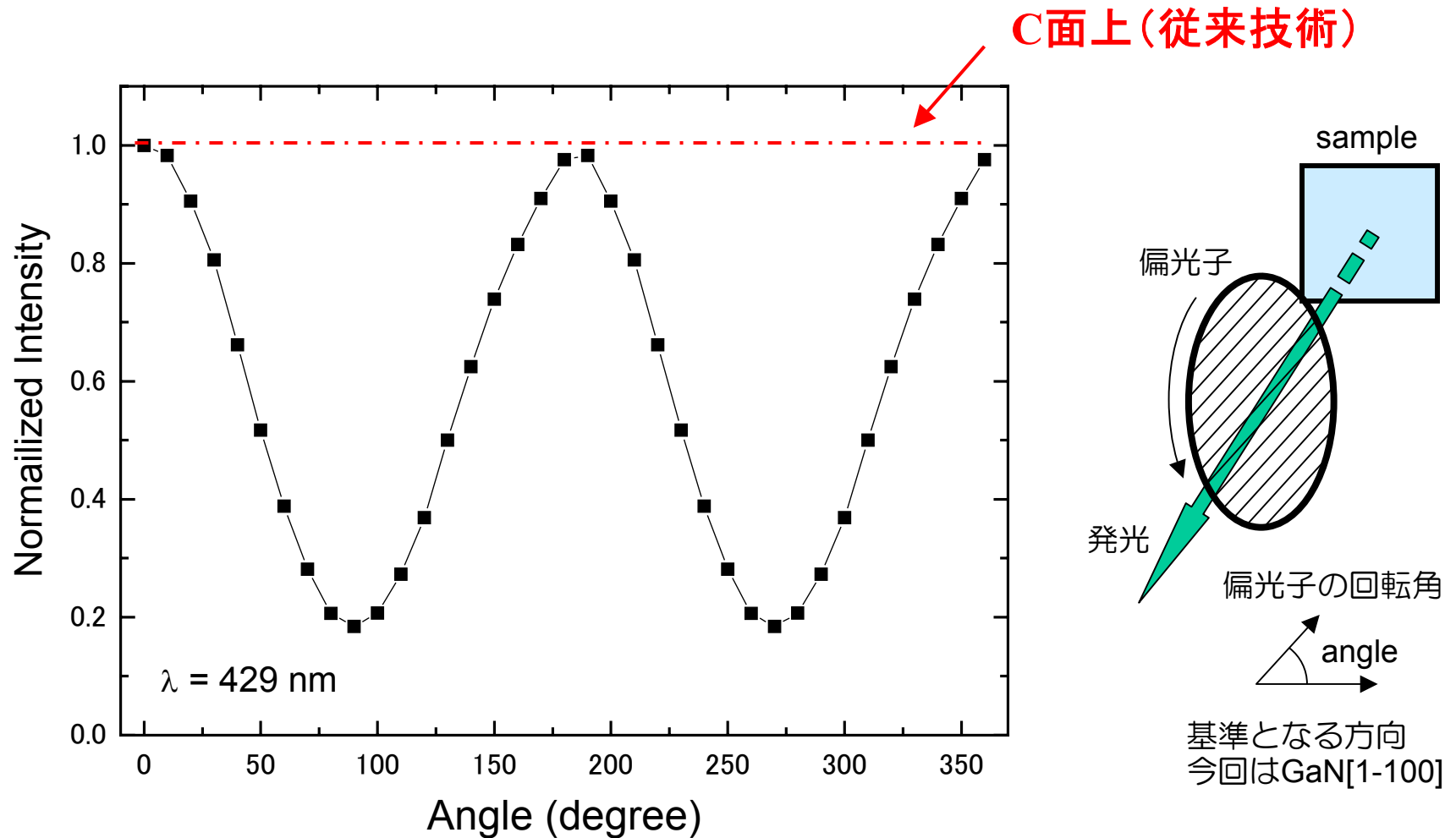
有機金属気相成長 (MOVPE) + デバイスプロセス



LED出力特性[日亜(京大)]

| | 20mA駆動時(定格) | |
|--------------------------------------|--------------------|-------------------|
| | 出力(mW) | 外部量子効率(%) |
| 青色LED | 1.76 | 3.0 |
| 緑色LED | <u>1.91</u> | <u>4.1</u> |
| 琥珀色LED | 0.54 | 1.3 |
| 参考資料： サファイア上 緑色LED (ほぼ同じ構造) | 4.89 | 10.3 |
| 半極性青色LED | 0.19 | 0.34 |
| 半極性緑色LED (以上UCSB) | 0.0193 | 0.042 |

偏光特性(京大)



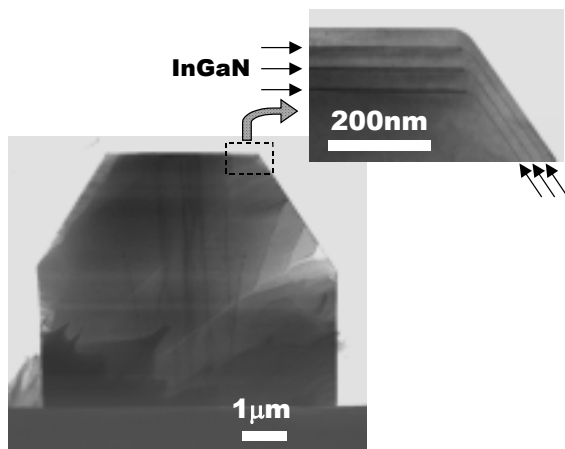
5:1の強度比(理論予測 : 4:1) ⇒ 液晶への応用が期待される

開発の流れ(まとめ)

半極性面{11-22}面を提案 (日亜, 京大)

再成長による{11-22} InGaN / GaN マイクロファセット量子井戸の作製(日亜)と高効率発光の実証(京大)

Appl. Phys. Lett. **85**, p.3122 (2004).
Appl. Phys. Lett. **87**, #231901 (2005).
(nature, **438**, p.892 (2005), research highlightsに取り上げられる)



半極性面{11-22}GaNバルク基板の利用 の提案および基礎成長特性の理解 (京大)

基板メーカーにGaN{11-22}基板の作製依頼.
有機金属気相成長法によりGaNホモエピタキシャル成長の条件解明およびInGaN / GaN量子井戸構造の作製に成功

第 67 回応用物理学会学術講演会発表予定.
2006年8月29日～9月1日 立命館大学

半極性面{11-22}InGaN/GaN LEDの試作 および基礎デバイス特性の評価 (日亜)

InGaN/GaN単一量子井戸を活性層とした発光ダイオードを試作し, そのスペクトル, 出力などを基本的なデバイス特性を測定. 青～琥珀色の発光を実現

Jpn. J. Appl. Phys. **46**, no.26 (2006) 掲載予定

{11-22}面に特有の偏光特性, 内部電界強度を光学的に評価

半極性面{11-22}InGaN/GaN LED の詳細な発光特性の評価 (京大)

今回の開発の結果

▶ 発光効率

実用レベルの効率：従来の半極性LEDに比べれば桁違いによい
ただし、現行のLEDにはまだ及ばない ← 構造など最適化の必要性

▶ 面内偏光特性

ほぼ理論どおりの偏光特性が確認された。

⇒ 液晶に利用すれば約50%の省エネが期待される。