

# PF-AR南棟におけるフォトカソード評価に関する報告

第61回 ERL検討会  
2012年4月27日(金)

高エネルギー加速器研究機構  
山本将博

## カソード開発メンバー(敬称略)

名古屋大

KEK

JAEA

金秀光、桑原真人、竹田美和

宮島司、本田洋介、内山隆司、山本将博

松葉俊哉(広島大)

### 最初の成果

S. Matsuba et al.,

“ Mean Transverse Energy Measurement of Negative Electron Affinity GaAs-Based Photocathode “

Japanese Journal of Applied Physics 51 (2012) 046402

今回の報告内容のほとんどの部分がこの論文に集約。  
詳しい内容はこの論文をご参照ください。

# 初期(熱)エミッタンス

ビーム発生時にもつエミッタンス

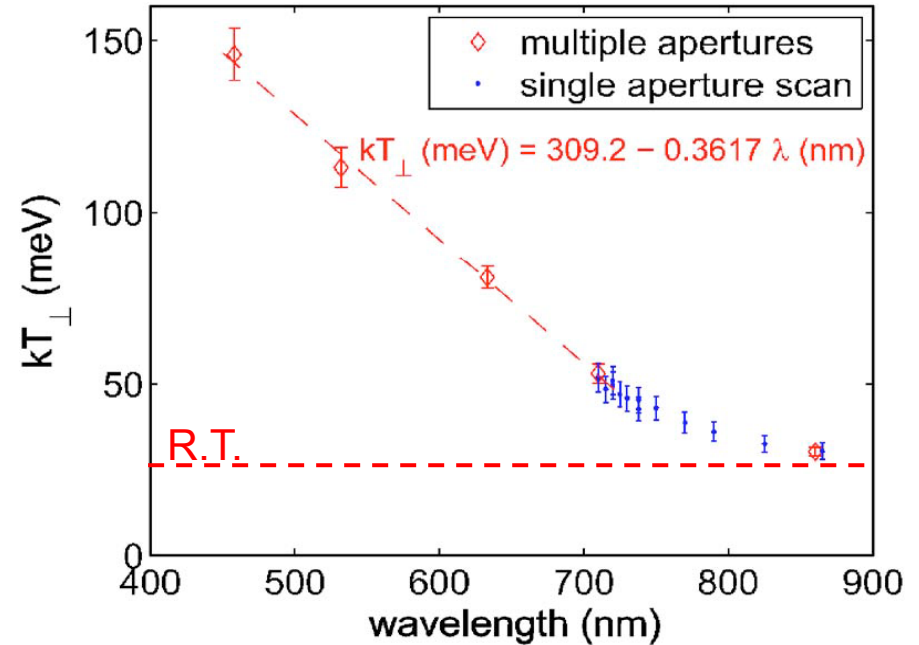
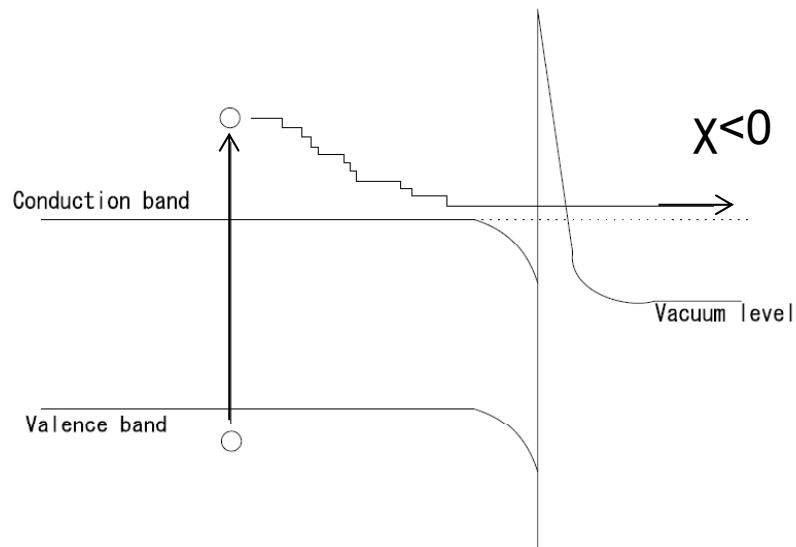
$$\begin{aligned}\epsilon_{x,\text{norm}} &= \frac{1}{m_e c} \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle p_x^2 \rangle - \langle x \cdot p_x \rangle^2} \\ &= \frac{1}{m_e c} \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle p_x^2 \rangle} = \sigma_x \sqrt{\frac{2\langle E_{kx} \rangle}{m_e c^2}}\end{aligned}$$

カソード上のビーム放出サイズ $\sigma$ を小さくすることでもエミッタンスは小さくできるが、ビーム発生後の空間電荷効果による悪化をその分強く受ける影響がある。

横方向エネルギー $\langle E_{kx} \rangle$  (Mean Transverse Energy) が低いカソードならば、ある程度大きな放出サイズに対してもビームのエミッタンスは低く抑えられ、かつその後の空間電荷力によるエミッタンスの増加も抑えられる。

いかにしてMTEを低く抑えるかが、ERL用の超低エミッタンスカソード開発の鍵。

# Mean Transverse Energy (MTE)



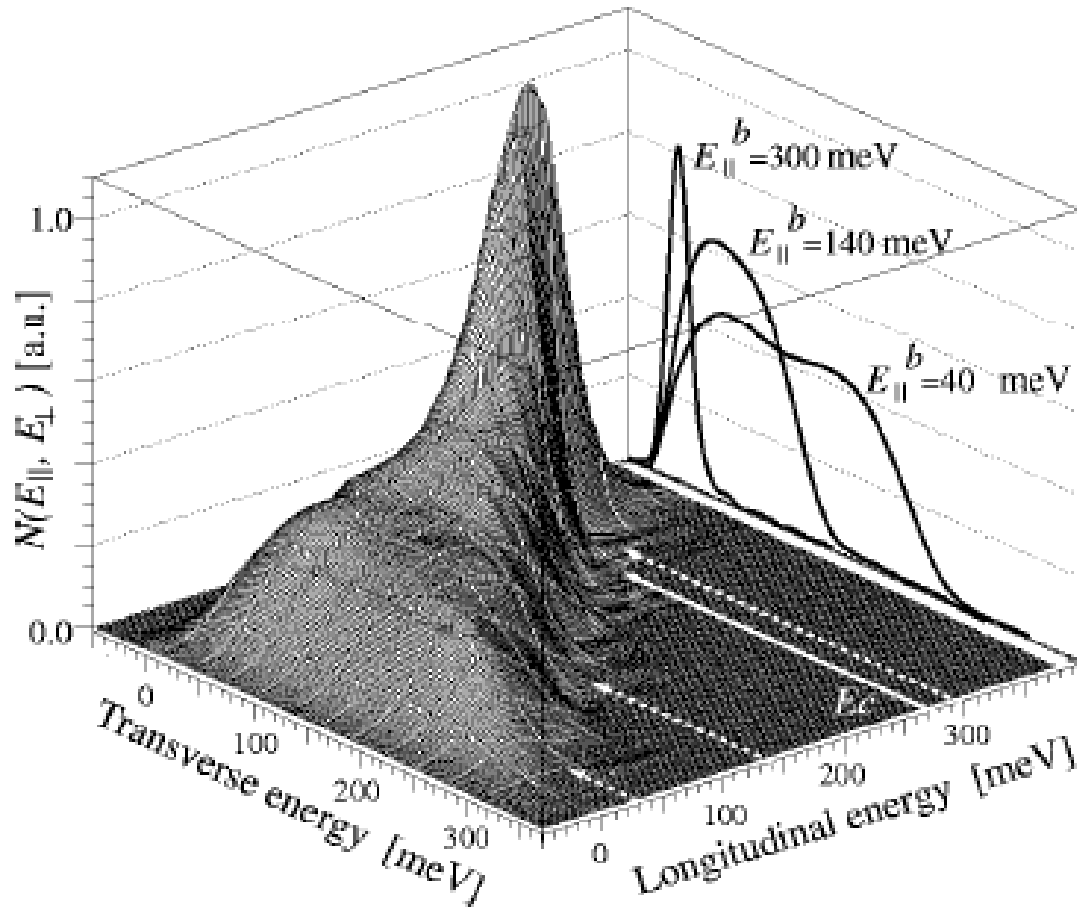
励起後、カソード表面までの拡散過程において余剰エネルギーを失う熱緩和が起こる。十分緩和された状態では、室温で $kT=25\text{meV}$ 。

I. Bazarov et. al., J. Appl. Phys. 103, 054901 (2008)

GaAsカソードでは、バンドギャップ近傍の励起でほぼ室温相当のMTEが得られている。

$$\sigma_x \sqrt{\frac{2\langle E_{kx} \rangle}{m_e c^2}} = \sigma_x \sqrt{\frac{k_B T}{m_e c^2}}$$

# GaAsのNEA表面から放出される電子の性質



Orlov et al., Appl. Phys. Lett. 78 (2001) 2721

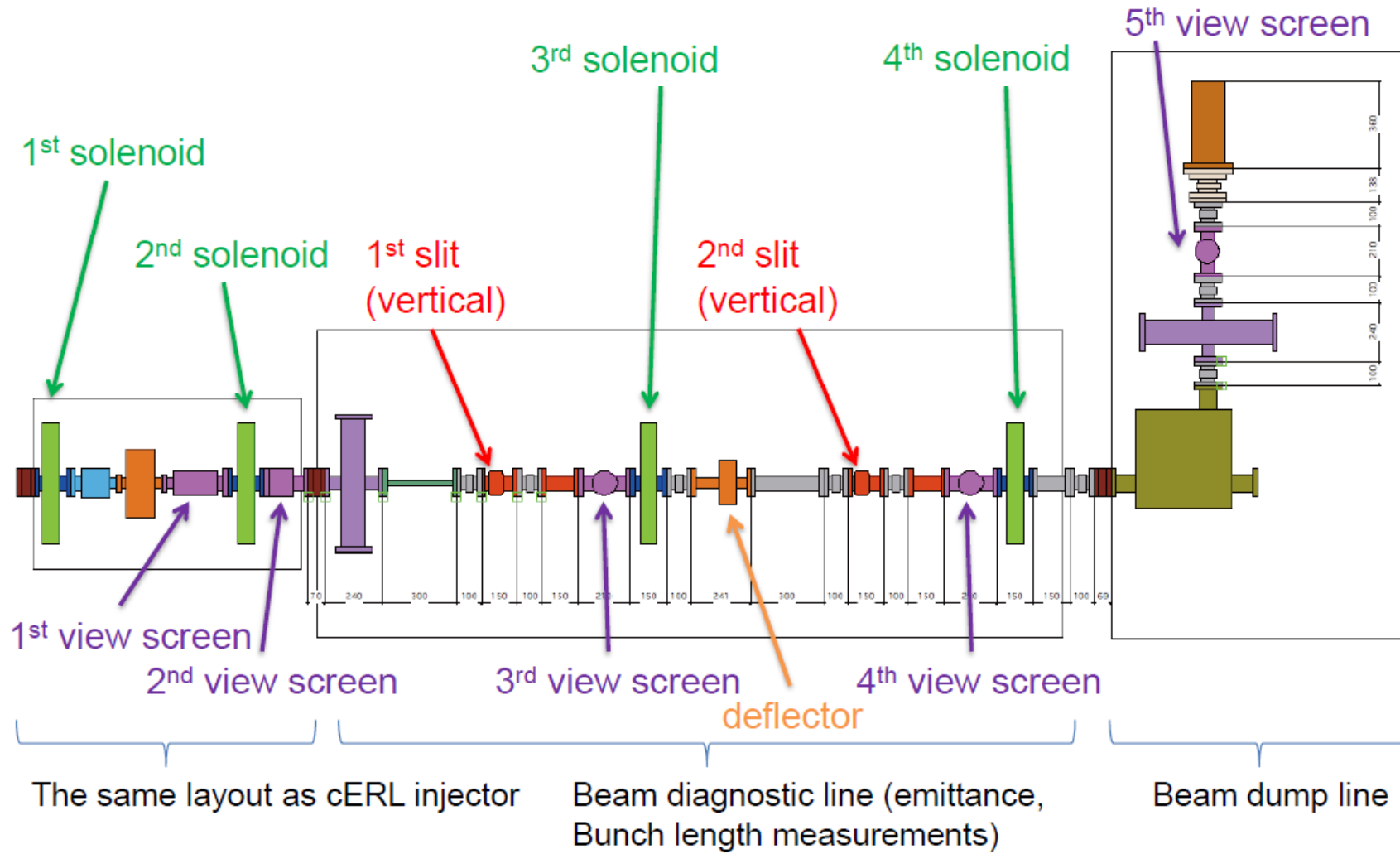
現状では、これらすべてをビームとして取り出すためにMTEは室温レベルよりも高くなる。いかにして主要成分の部分だけをビームとして取出すのが、MTEを低く抑える鍵と思われる。

負の電子親和性 $\chi \sim 300$  meV時の放出された電子の縦と横方向のエネルギー分布

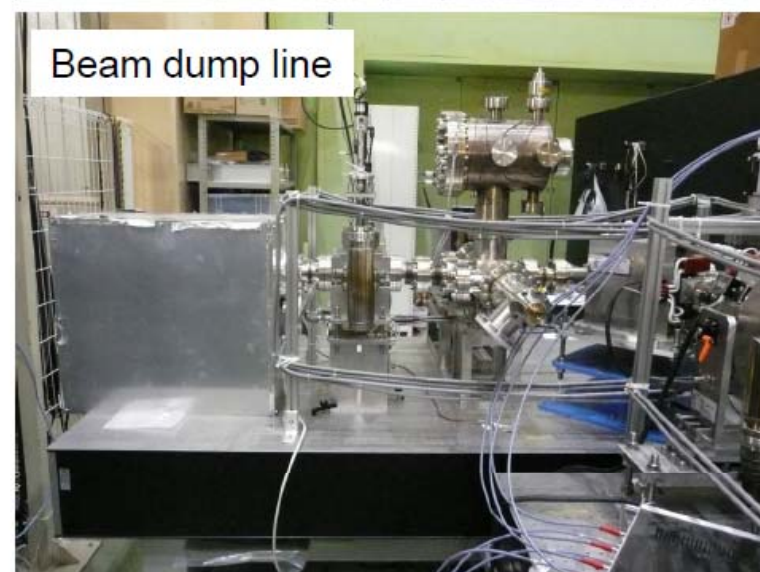
主要成分は、ほぼ縦(進行)方向にエネルギーを持つ電子。横方向エネルギーはほぼ室温程度。

放出前の電子分布がすべて緩和電子の分布と仮定すると、横方向と縦方向のエネルギー和が300 meVのものは弾性散乱、それ以下のものは非弾性散乱によって分布が広がると考えられる。

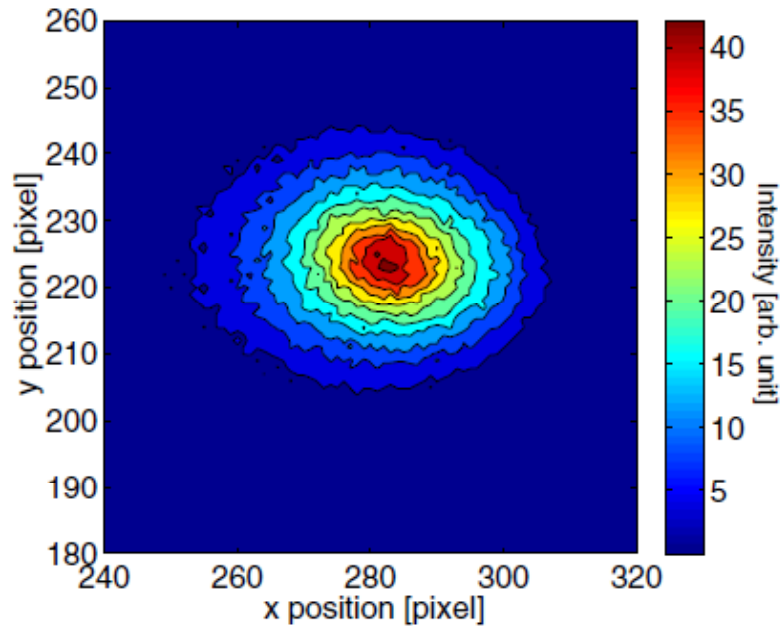
# PF-AR南棟のビーム診断系



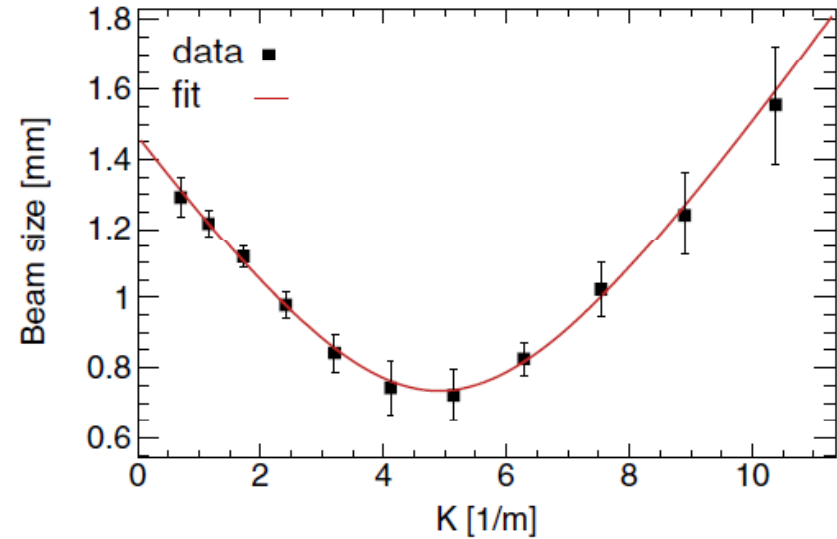
# PF-AR南棟のビーム診断系



# ウェストスキャンによるエミッタンス測定



S.Matsuba et al., Jpn. J. Appl. Phys. 51, 046402 (2012)



ソレノイドの収束磁場を変えながらスクリーン上でのビームサイズをウェストまわりで測定し、ソレノイド磁場(焦点距離)とビームサイズの2次曲線の関係からエミッタンスを見積る。

$$\epsilon_{x,\text{norm}} = \beta\gamma \frac{\sqrt{A \cdot C}}{L^2}$$

L:ドリフトスペース(ソレノイドからスクリーンまで)  
A:2次関数曲線の2乗項の係数  
C:最小値



# 2011年までに評価を行ったカソード

## 1. 厚さの異なるGaAsカソード

- ・障壁Buffer層タイプ

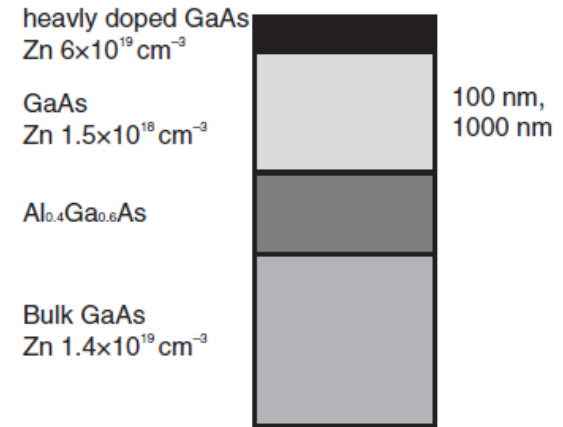
100nm, 300nm, 1000nm

(エミッタンス、応答性の評価)

- ・谷型Buffer層タイプ

300nm, 1000nm

(応答性測定のみ)



(図は障壁bufferタイプ)

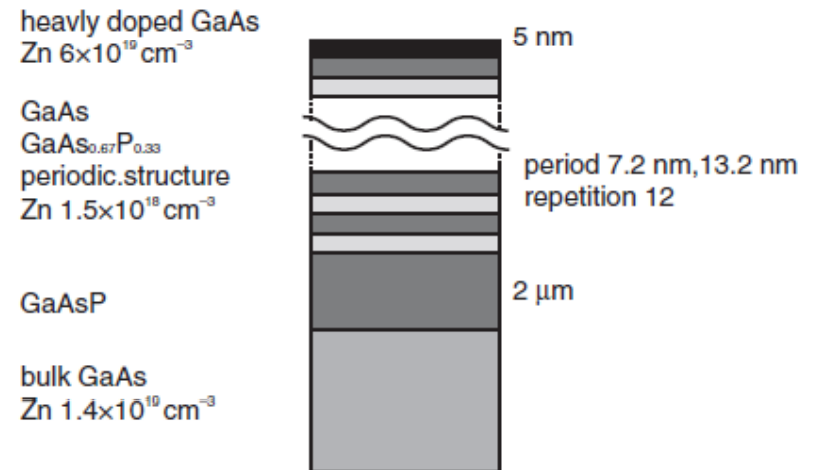
## 2. 超格子カソード

- ・GaAs/GaAsP超格子

伝導帯ミニバンド幅の異なる

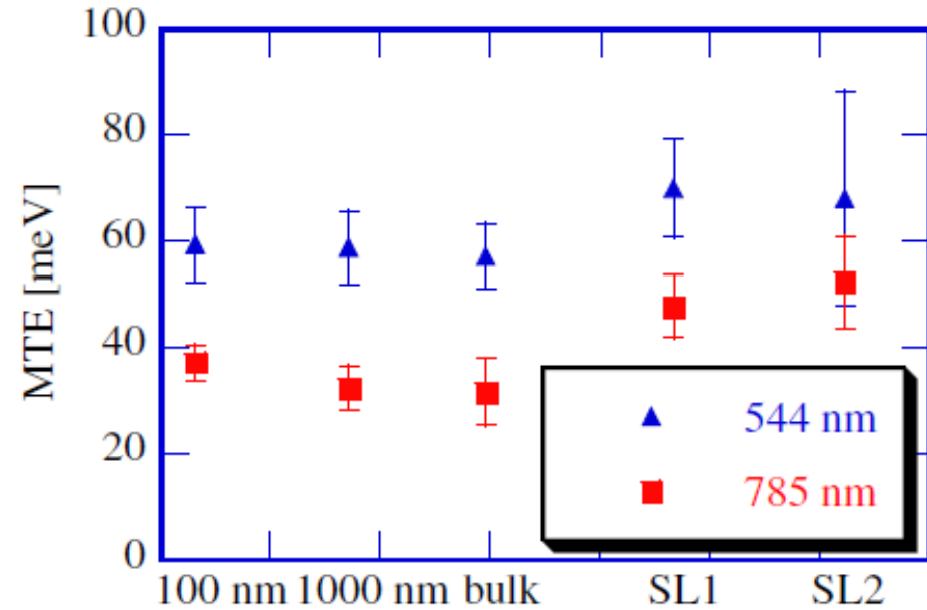
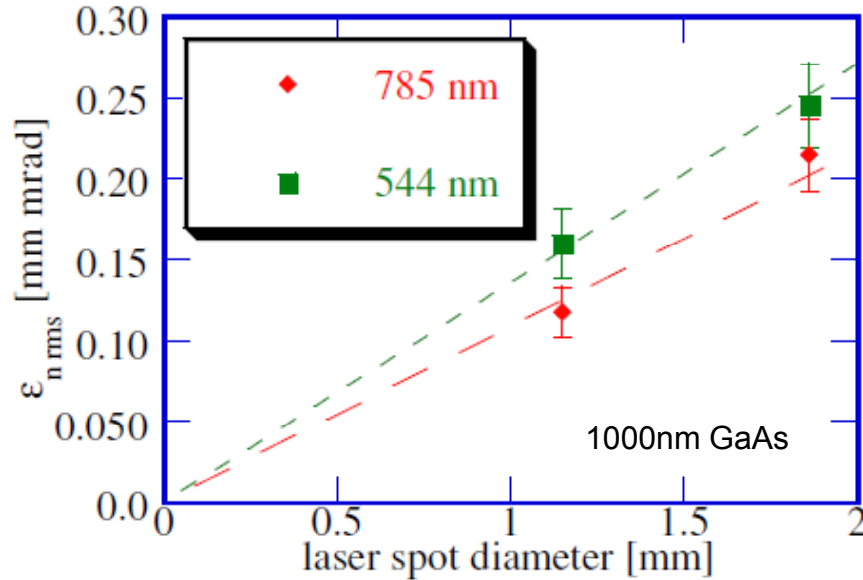
2種類について測定。

活性層は共に100nm



# MTEの見積り

S.Matsuba et al., Jpn. J. Appl. Phys. **51**, 046402 (2012)



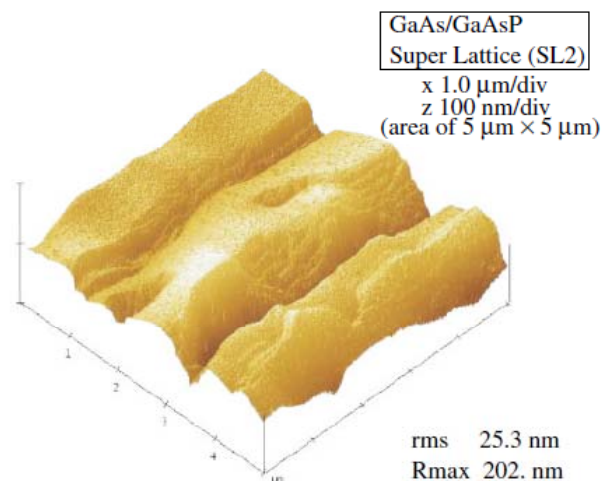
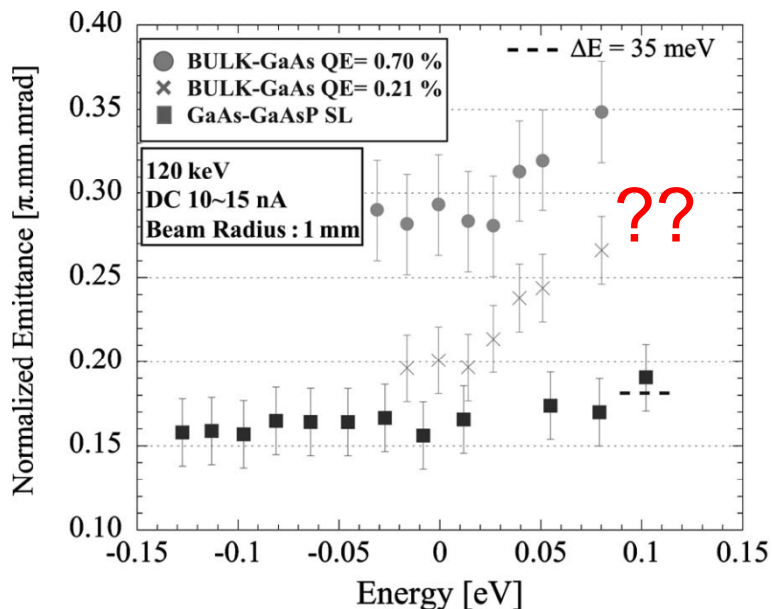
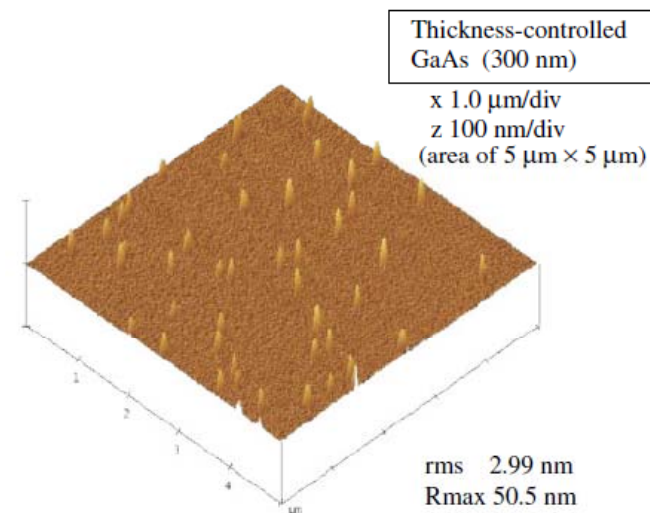
$$\epsilon_{x,norm} = \sigma_x \sqrt{\frac{2\langle E_{kx} \rangle}{m_e c^2}}$$

異なるレーザー径のエミッタンスを測定し、原点を通る直線でfit。傾きからMTEを求める。

厚さの異なるGaAs結果より、100nmで十分に熱緩和されていると言える。544nm励起では、吸収長が短く、表面近傍で十分緩和されていない電子が放出される影響でMTEは大きくなる。それでも緩和されない場合に見積もられるMTEよりは低い値。

# 超格子カソードのエミッタンス

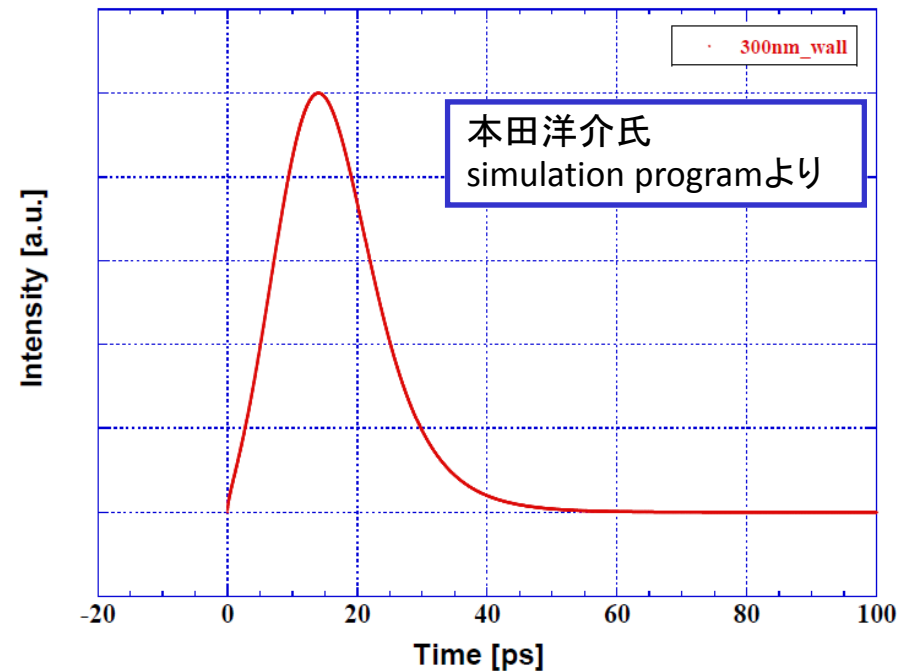
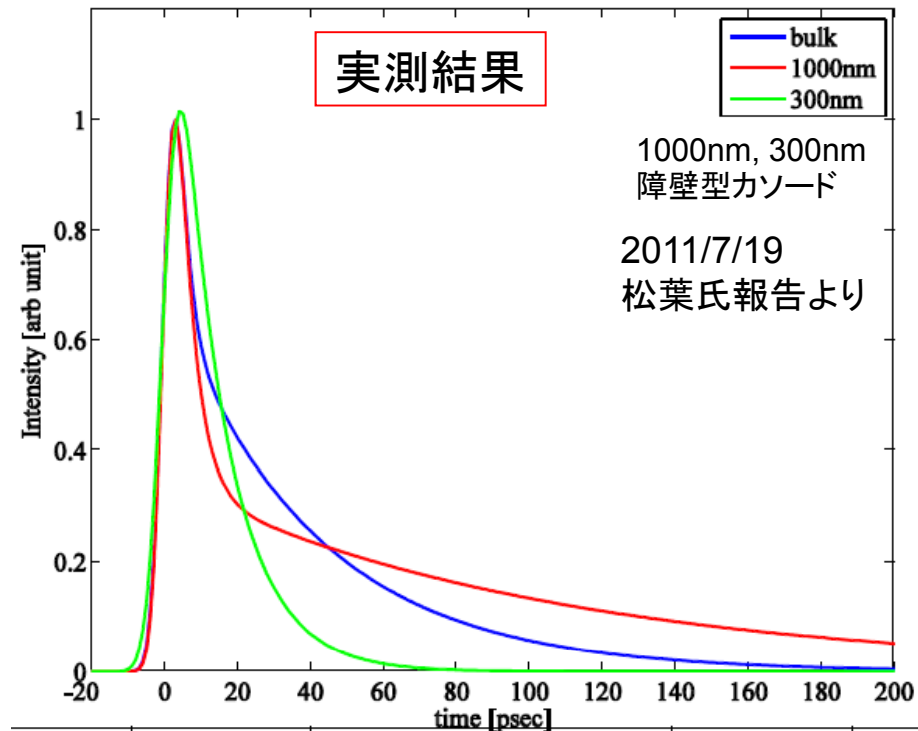
名古屋大でも過去に同じ組成、構造の超格子を測定したが、今回の結果はそれを支持しない。表面の粗さの影響を考慮すると、Bulk-GaAsよりもMTEが大きくなる我々の測定結果は矛盾しない。エミッタンスを良くするために超格子は必ずしも良くない結論。格子整合系の超格子で再評価を現在実施している。



N.Yamamoto et al., J. Appl. Phys. **102**, 024904 (2007)

S.Matsuba et al., Jpn. J. Appl. Phys. **51**, 046402 (2012)

## 2011年までの評価結果(3): 時間応答性

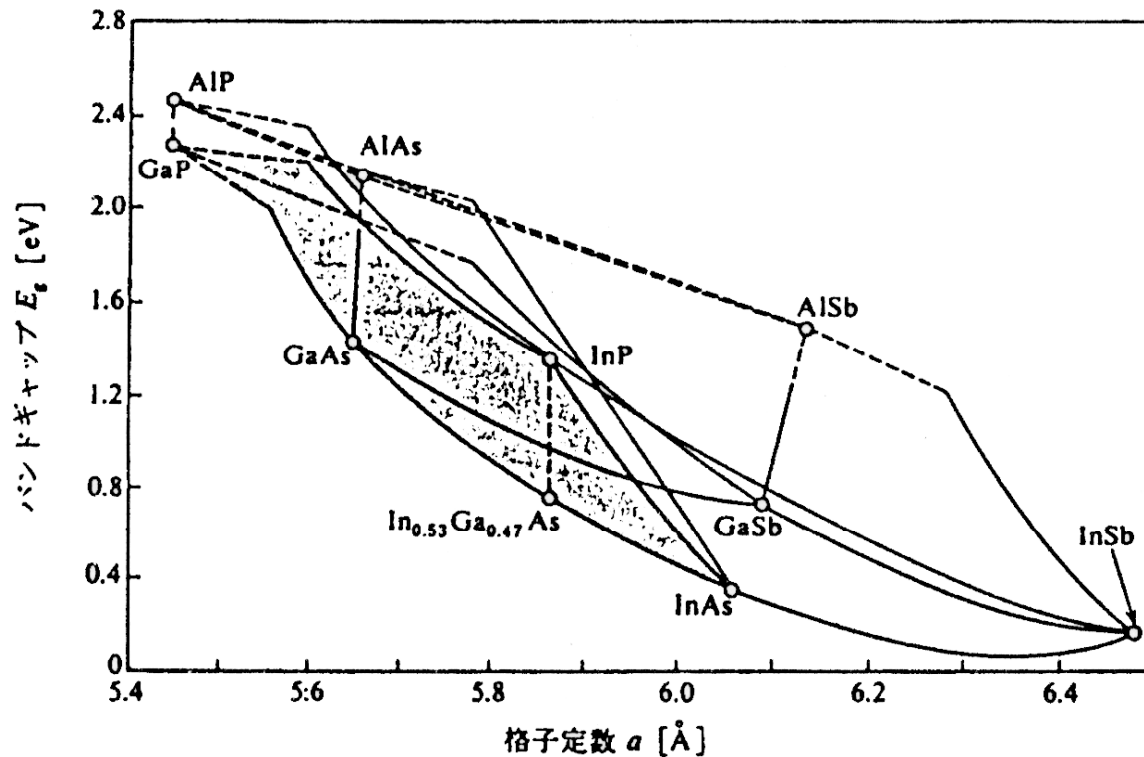


吸収長を決めるとGaAs層伝導帯電子の拡散係数が求められる。  
吸収長 $1\mu\text{m}$ で拡散係数はおよそ $35\text{ cm}^2/\text{s}$ あたりの値。

GaAsカソードの応答性に関する論文は5月末頃を目標に論文投稿の予定。

532nm励起の場合は応答性は問題無いが、Band gap付近の励起の場合、  
活性層厚さは数百nm程度(障壁無し)以下にする必要があるそうである。

## 2012年以降の状況



2月以降よりGaAsだけではなく、AlGaAs, InGaAs, InGaP系などの3元混晶系のカソード評価を開始している。  
Cornell大でGaAsPカソードのエミッタンス測定に関する報告、論文はあるが、他の3元半導体材料系についてはまだ報告は無い。  
結晶材料およびその構造とMTE, 応答性の関係を調べ、GaAsよりも有望なカソードを探索する。

## まとめ

AR南棟のカソード評価系は稼働状態に。

- ・1日1カソードのエミッタンスと応答性の測定が可能。
- ・実測したその場でエミッタンスの評価ができる態勢が出来上がった。

どこまでMTEが下げられるのか、何がMTEの下限を制限し、MTEを上昇させるのかを明らかにすることが今後の低エミッタンスカソード開発のミッション。

ただし、5月末頃で評価ラインはERL開発棟のビーム診断部へ移設されるため、AR南棟でのエミッタンス、応答性の評価は行えない状況となる。