超低エミッタンス偏極電子ビームの生成

桑原真人 (Makoto Kuwahara)
(名古屋大学SP研究室)

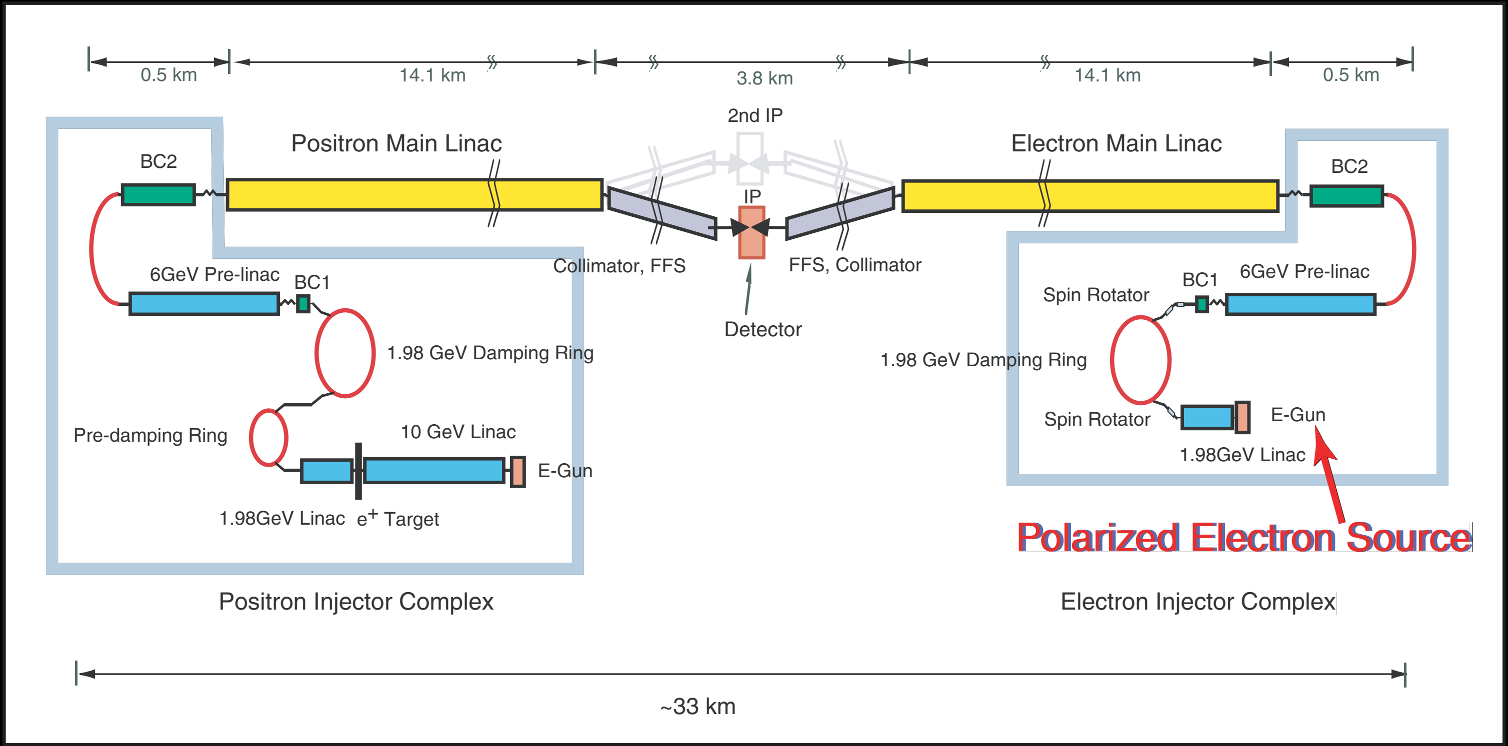
目次

- 目的 (GLC-Projectなど)
- 偏極電子生成原理
  (GaAs型半導体フォトカソード、ビーム引き出し原理など)
- 偏極電子源装置
  (偏極電子銃および偏極度測定装置)
- 現在の課題
- 偏極電子ビームの低エミッタンス化への試み
  (NEA-GaAs、およびtip-GaAsからのビーム生成)

目的

- GLC(Grobal Linear Collider) Project

  500GeV～1TeV電子陽電子リニアコライダー計画

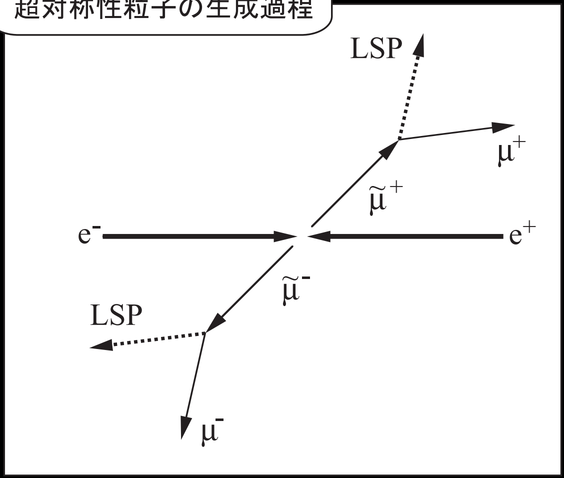


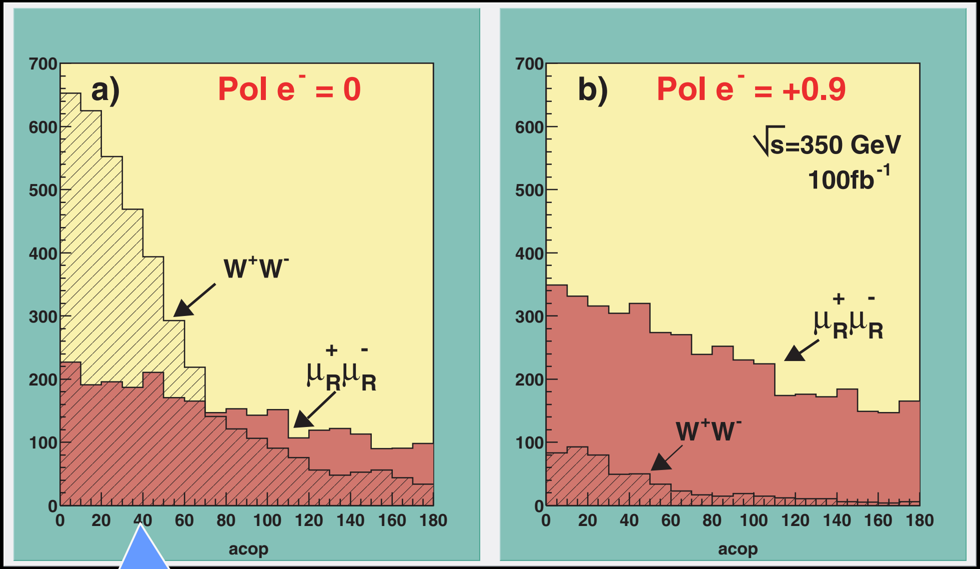
GLC概念図　(GLC Project Report,2003より)

偏極電子ビームの有用性

超対称性粒子の探索

超対称性粒子の生成過程

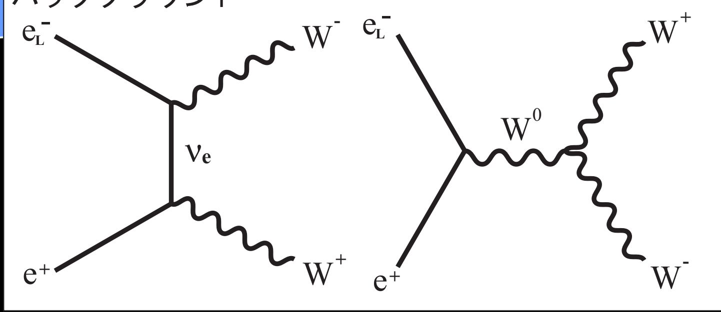




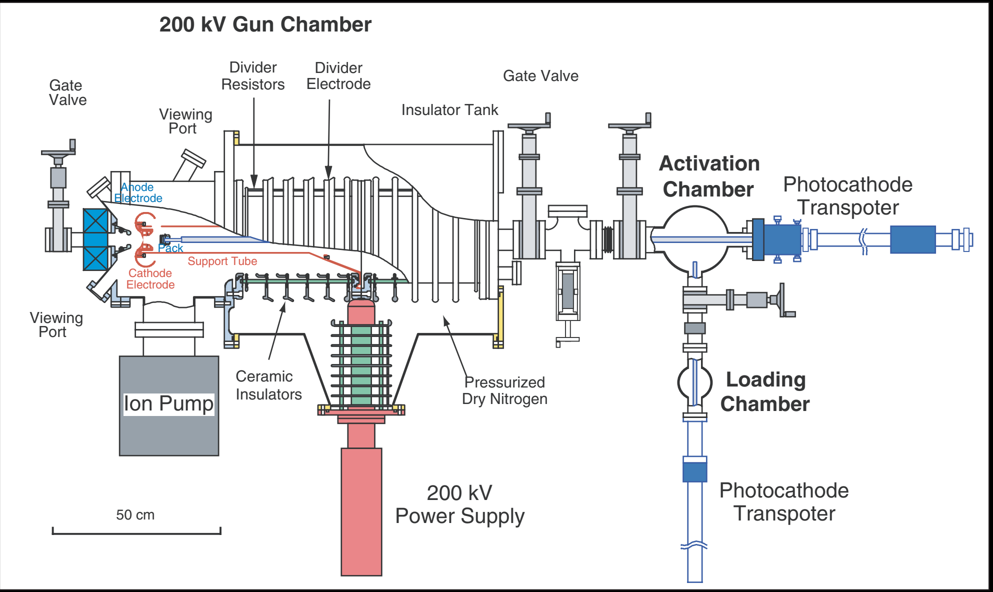
GLC Project Report,2003より

右巻き偏極電子により
バックグラウンド除去が可能

バックグラウンド

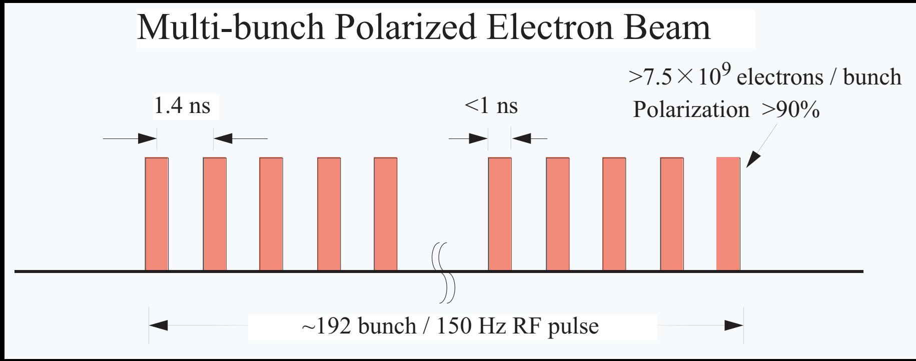


200keV偏極電子源 (NPES-3) 概要図



偏極電子源に求められる性能

Item	Value
バンチ当りの電子数	>7.5×10 ^{9} 個
バンチ幅	< 1 ns
バンチ間隔	1.4 ns
トレイン内バンチ数	192 個
トレイン繰り返し周波数	150Hz
エミッタンス	< 10πmm･mrad
寿命	> 200 h (1week)



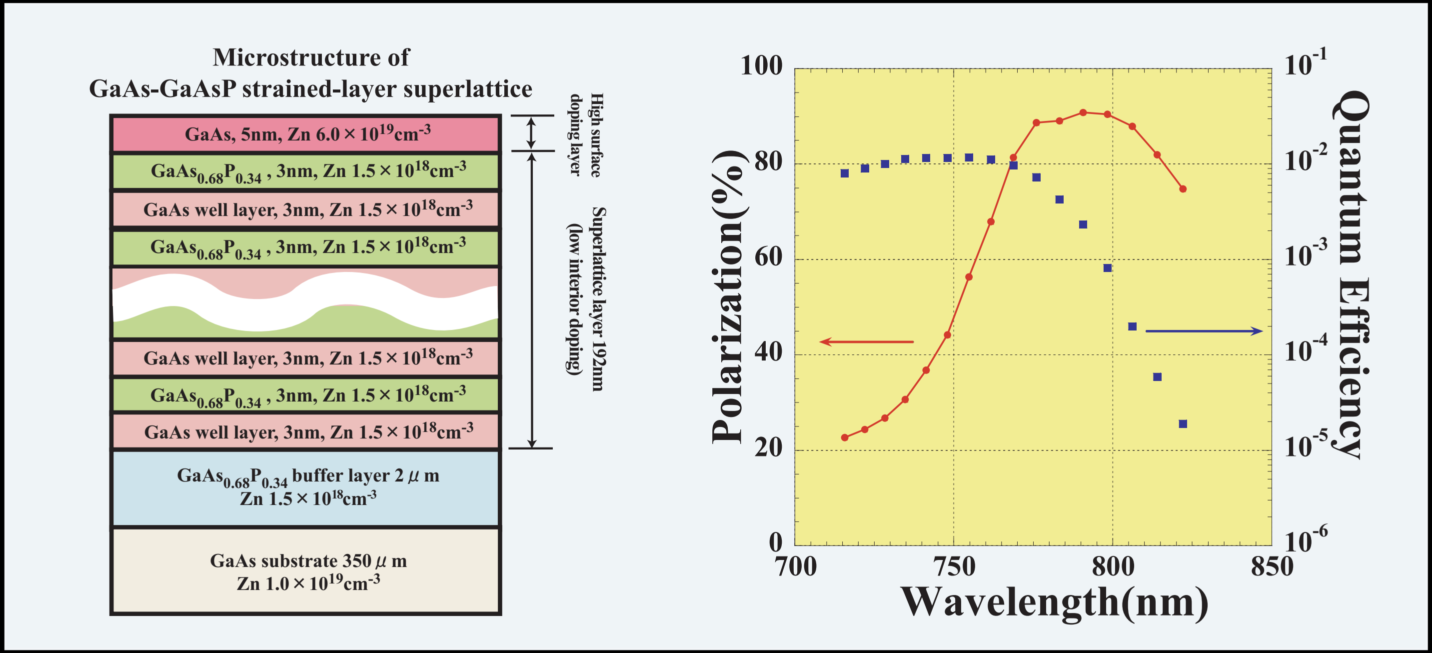
偏極電子ビームのバンチ構造

偏極電子生成原理

1．フォトカソード

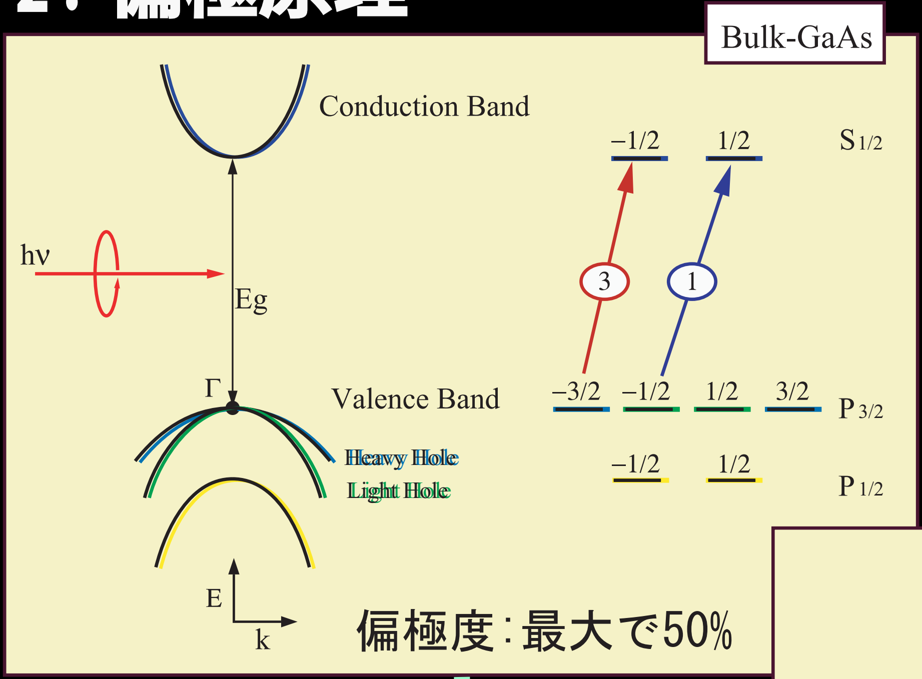
GaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソードにより

Q.E.>0.2%、Polarization〜90%の性能を実現している。



名古屋大工学研究科・竹田研究室、大同特殊鋼との共同研究

2. 偏極原理



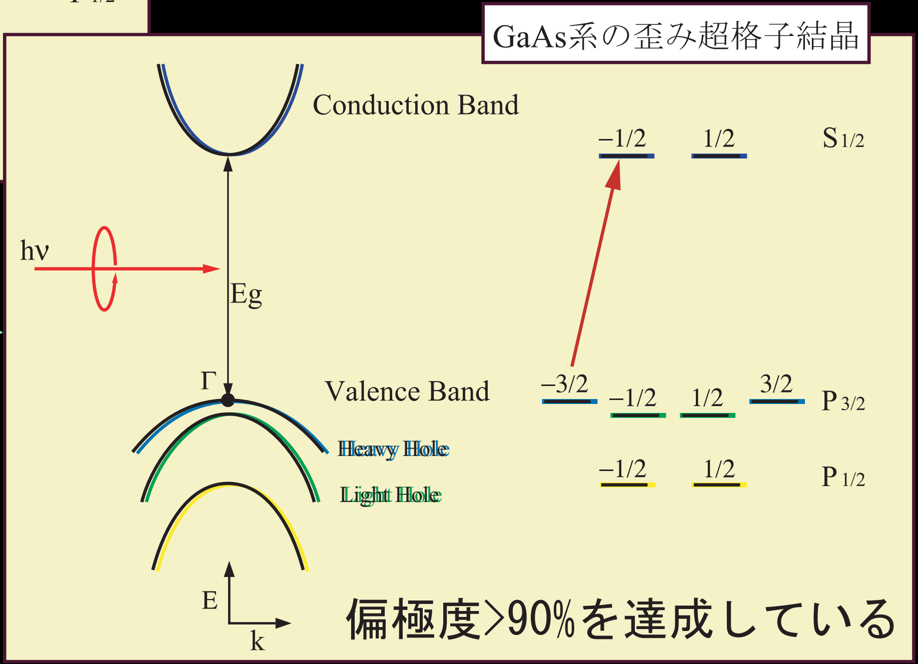
GaAs系半導体フォトカソードに円偏光レーザーを照射し、特定のスピンの電子を価電子帯から伝導体に選択的に励起

歪み超格子構造により

Γ点における縮退を解く

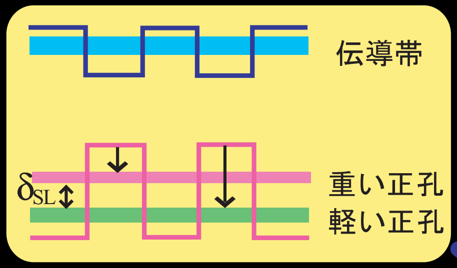
↓

偏極度＞90%



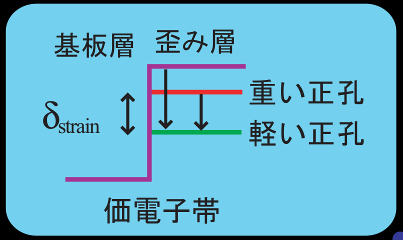
歪み超格子構造フォトカソード

超格子構造フォトカソード

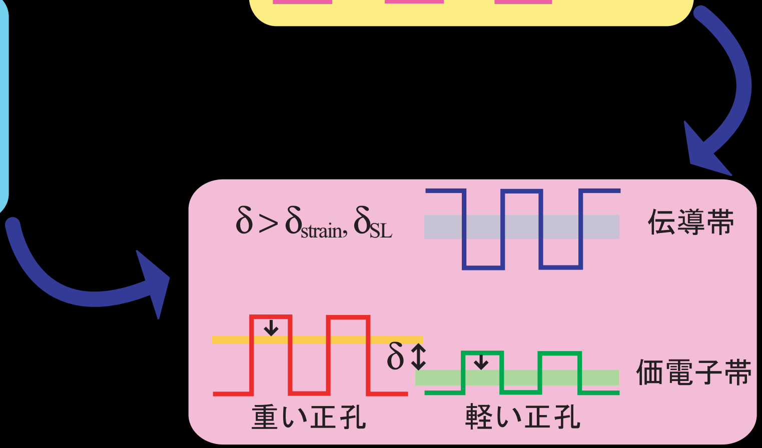


- 高い量子効率
- NEA表面電荷制限現象の克服
- 選択励起性の向上

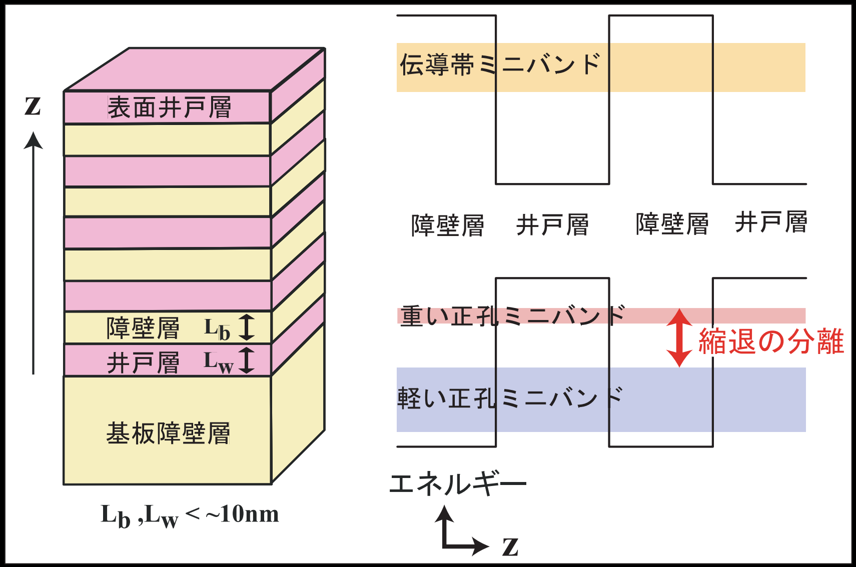
歪み構造フォトカソード



- 重い正孔、軽い正孔準位の縮退分離が大きい
→(高い偏極度)

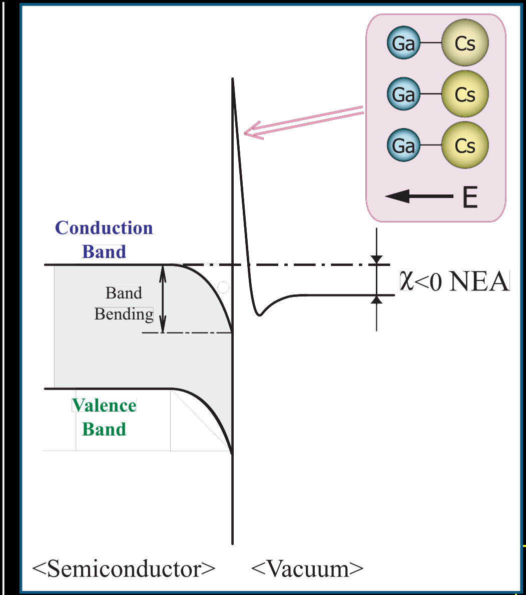


歪み超格子構造フォトカソード



3. 電子の真空への引き出し

NEA(負の電子親和性)表面



NEA表面の作成

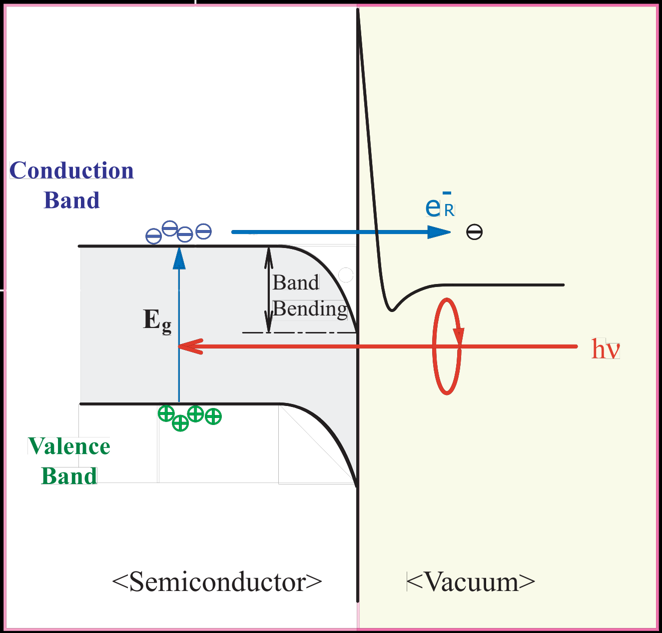
p-dopeによる表面
Band-Bending
＋
Cs付加による真空準位の低下

↓

χ(電子親和度) <0

価電子帯の電子が真空中に出ることが可能

偏極電子ビーム生成過程図



(欠点) **NEA表面寿命問題**

暗電流、真空度に非常に敏感

→ 劣化しやすい

偏極電子源装置

構成

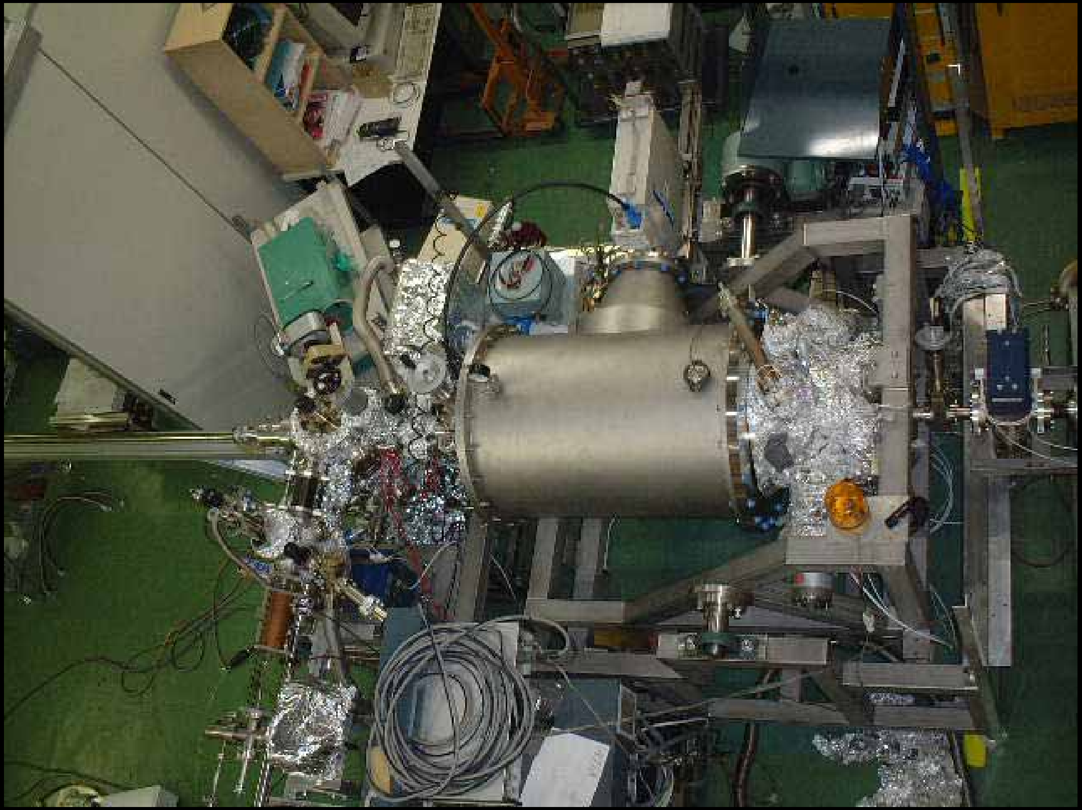
①電子銃
②半導体フォトカソード結晶
③レーザー
(フォトカソード励起用)

→ 偏極電子源

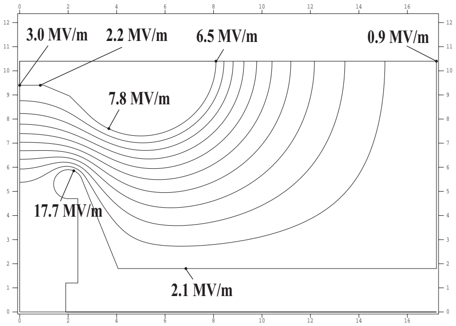
④偏極度測定装置
(Mott散乱偏極度測定装置)
⑤エミッタンス測定装置
(Pepper-Pot法による)

→ 偏極電子ビーム 性能評価装置

①電子銃 (NPES-III)



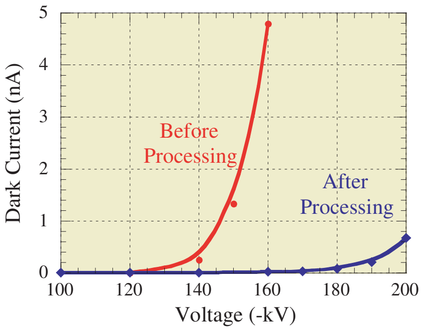
Electrodes



POISSON simulation

Maximum Field Gradient at 200kV	
Photocathode	3.0MV/m
Cathode electrode	7.8MV/m

High Voltage Test



High voltage processing with pure N_2 ~ 1×10^{-6} Torr

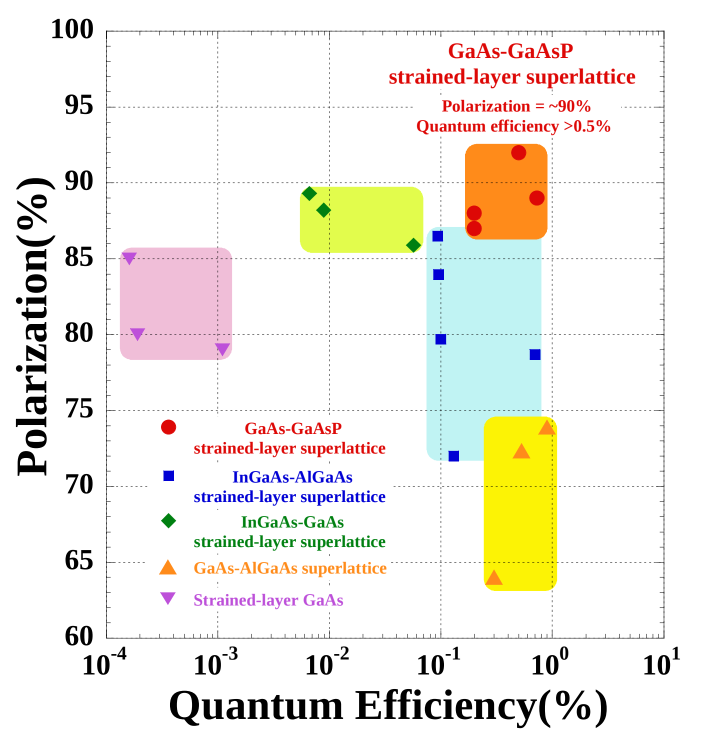
↓

Dark current < 1nA @200kV

- ロードロック機構の採用：Gun-ChamberとNEA作成が別
- セラミックを多段構造にすることで分圧

200keV(Nagoya-PES)＞120keV(SLAC-PES)

②フォトカソード



フォトカソード性能比較図

GaAs-GaAsP歪み超格子により

- Q.E.＞0.2％、Polarization～90％
- Surface-Photo-Voltage Effect
  の克服→マルチバンチビーム生成可能

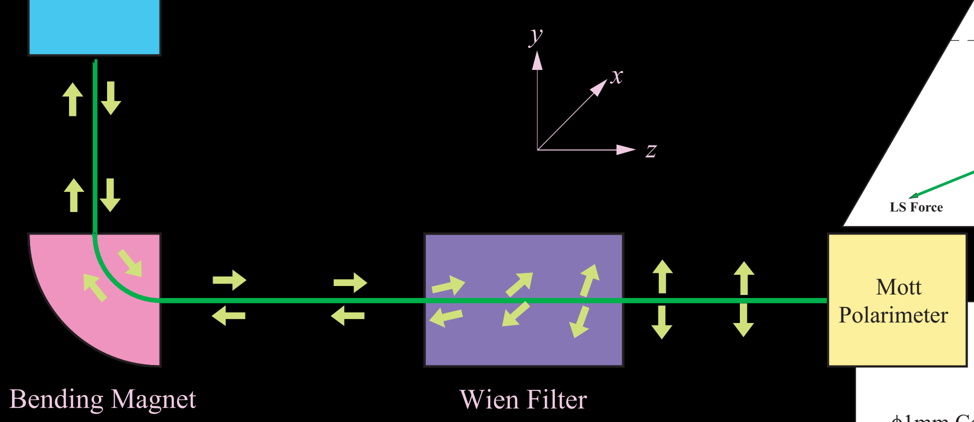
③レーザー

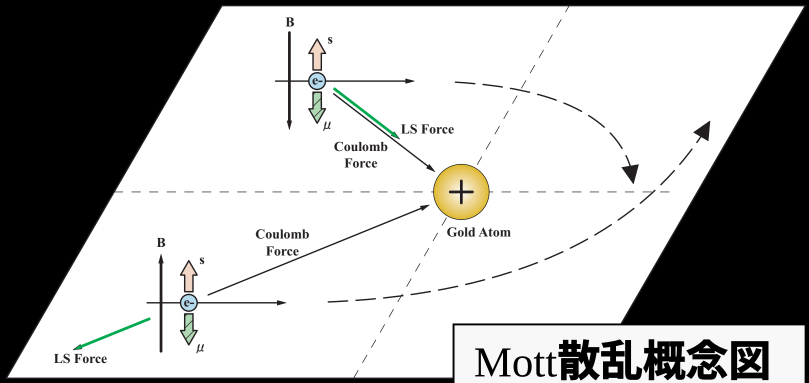
Model3900(SP社製) CW-Laser (Millennia-Vs-J 532nm,5W励起)	
波長λ	730nm～950nm

Tsunami(SP社製) Pulse-Laser (Millennia-Vs-J 532nm,5W励起)	
波長λ	730nm～850nm
パルス幅	～ 20 ps
繰り返し周波数	81.25 Hz

④偏極度測定系
(Mott散乱偏極度測定装置)

偏極度測定方法



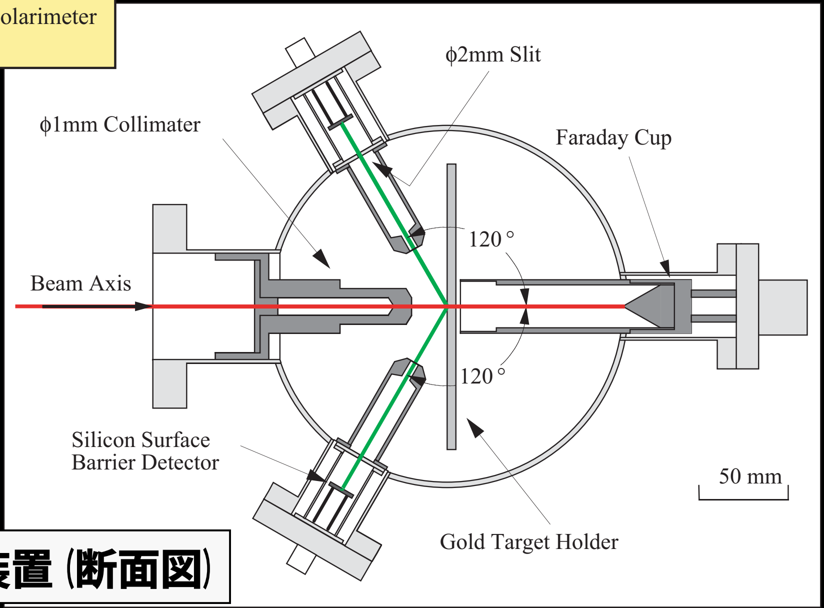


Mott散乱概念図

偏極度P

$$P = S_{eff} \cdot \frac{N_R - N_L}{N_R + N_L}$$

S_{eff}：実効シャーマン関数



偏極度測定装置 (断面図)

現在の課題 @Nagoya-Group

- 電子銃 (200keV偏極電子源)
  - ・NEA表面寿命問題解決に向けた真空度の向上
    - 真空度～5×10^{-12}Torr達成(2004.1)
  - ・実用的なマルチバンチビーム生成準備段階
  - ・エミッタンス測定装置の立ち上げ
    - ペッパーポット法エミッタンス測定系の準備完了
- フォトカソード開発
  - ・歪み超格子結晶の開発・評価
    - 量子効率スピン分解による解析 (T.Nishitani et al.: J.Appl.Phys.(2004))
  - ・Cs-Teフォトカソードの開発
  - ・低エミッタンス化に向けた新型フォトカソードの開発

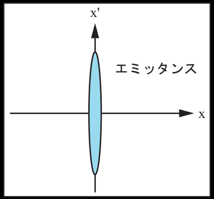
偏極電子ビームの低エミッタンス化への試み

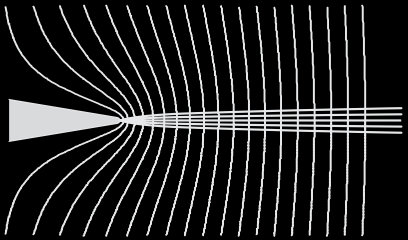
1.低エミッタンス化（初期エミッタンス）

①ビーム断面積・小 → 先端微小領域よりの電界電子放出を利用

〈手法：カソードをニードル形状にする〉

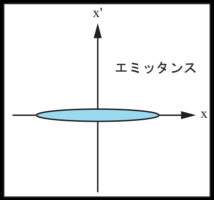
Field-Emission





②横方向運動量拡がり抑制

NEA surface



2.偏極電子ビーム

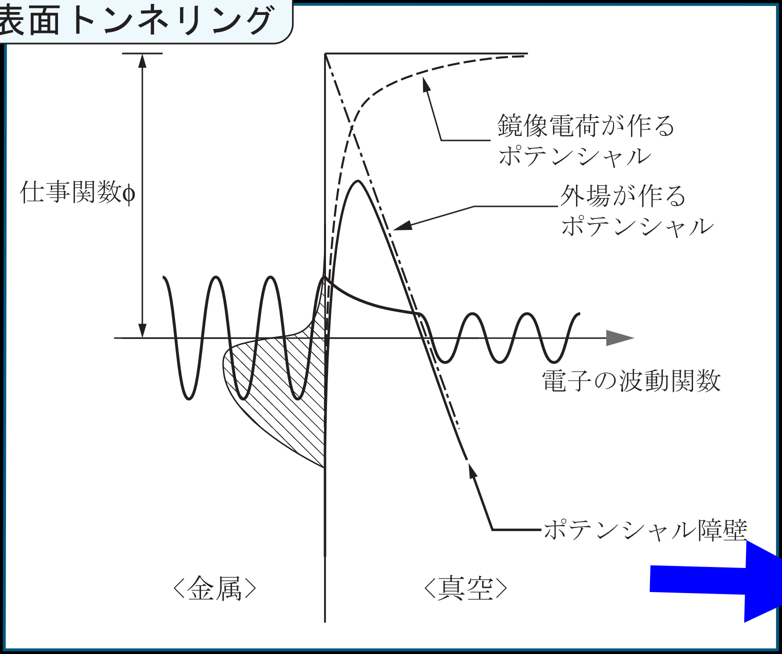
GaAs型フォトカソード

我々が有する世界最高の
偏極度・量子効率の技術を利用

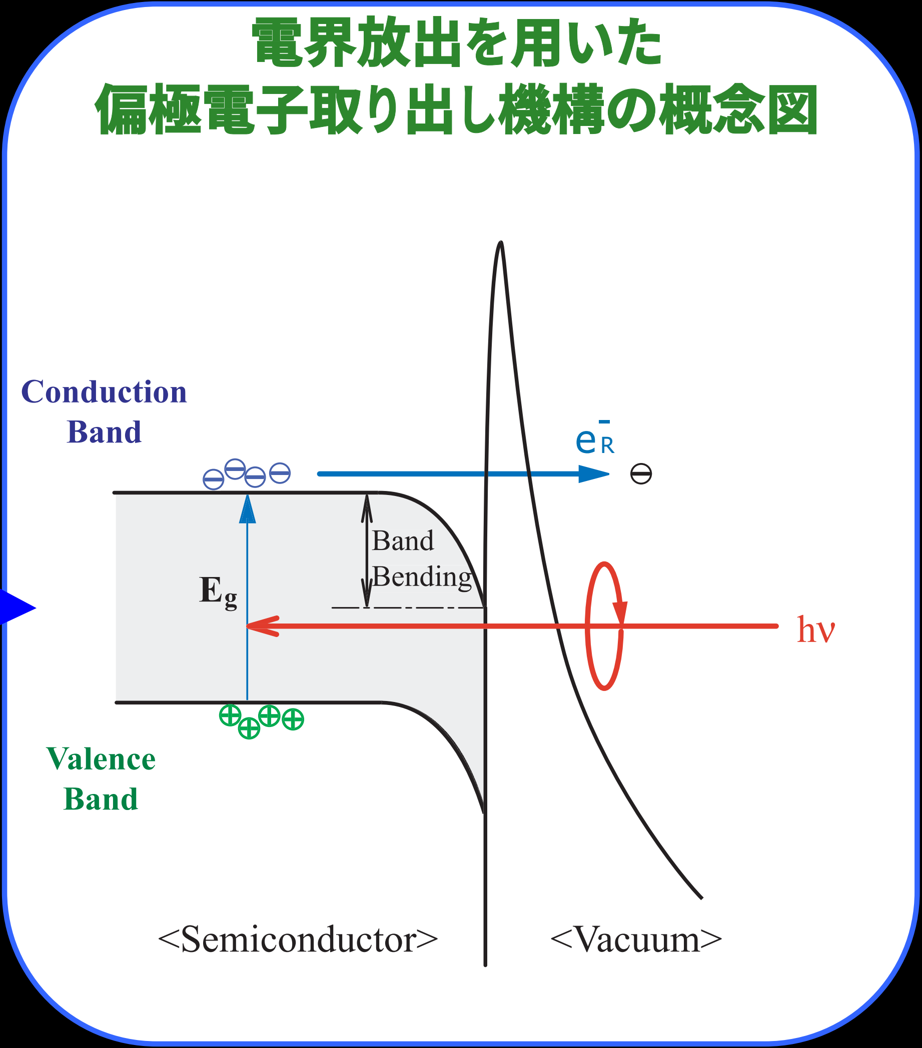
ニードル形状を持った
GaAs結晶

今回使用する方法:電界放出機構

強電界印加による
表面トンネリング



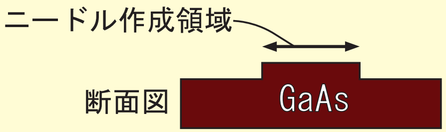
NEA表面寿命問題の
克服にもつながる



Tip-GaAs作成方法

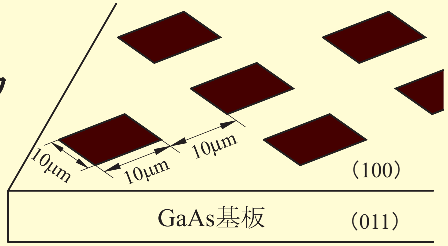
１．GaAs基板準備

①洗浄
②SiをGaAs基板につけ、エッチング
③Si取り除き、ワックス除去
④エッチング、純水洗浄



２．フォトリソグラフィー

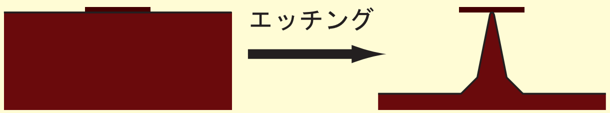
①レジストのスピンコート
②プリベイク
③露光
④現像
⑤ポストベイク



３．ウェットエッチング

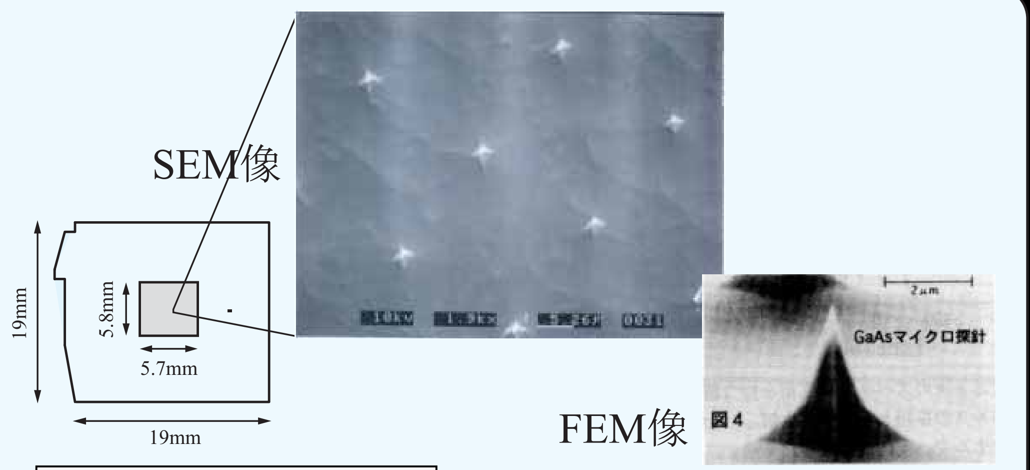
①H_3PO_4エッチング
（異方性エッチング）
②洗浄

← ニードル作成



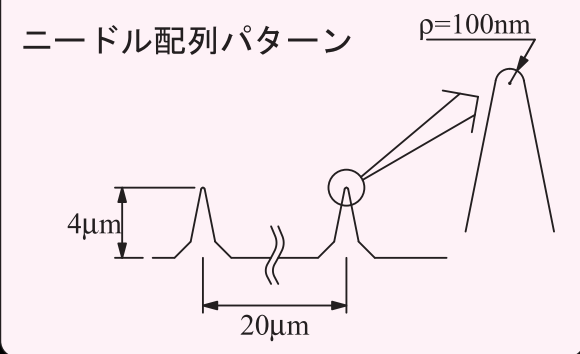
４．後処理

①自然酸化膜除去
②洗浄

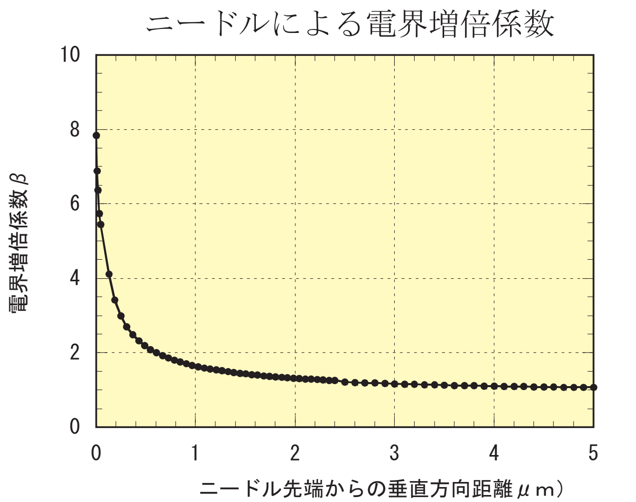


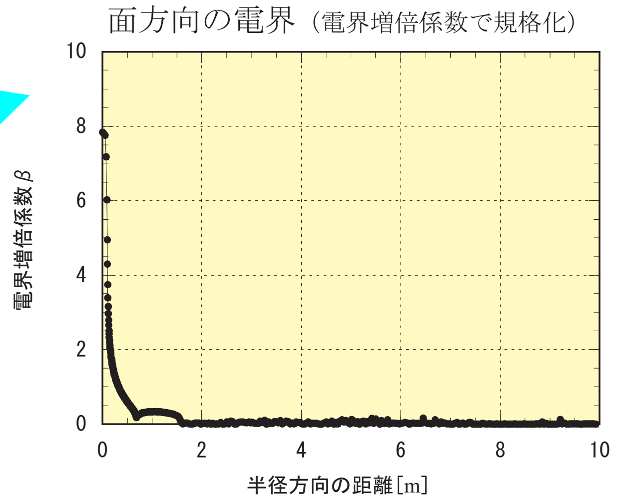
実際に作成した
tip-GaAs

作成協力：電気通信大学山口研究室



電界シミュレーション結果

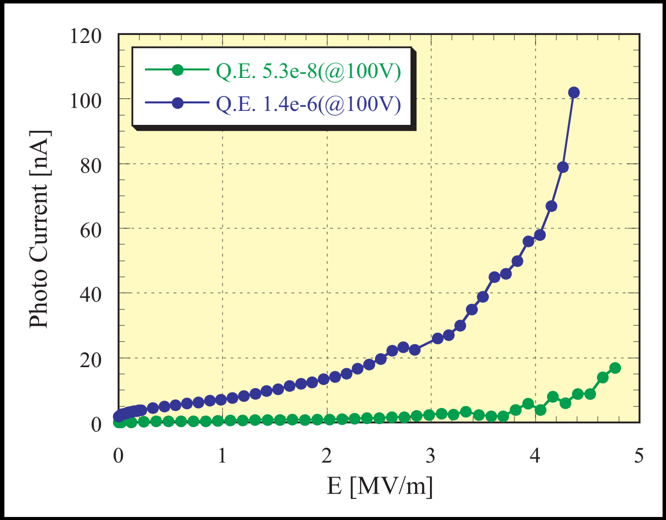




ニードル先端における電界増倍係数βは約8程度
(平坦なときに比べて)

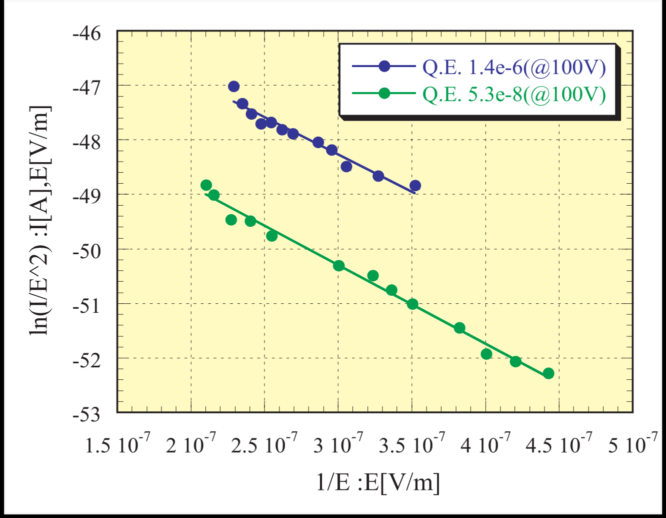
Tip-GaAsの特性実験結果

光電流の電界特性



F-N Plot

光電流のF-Nプロット

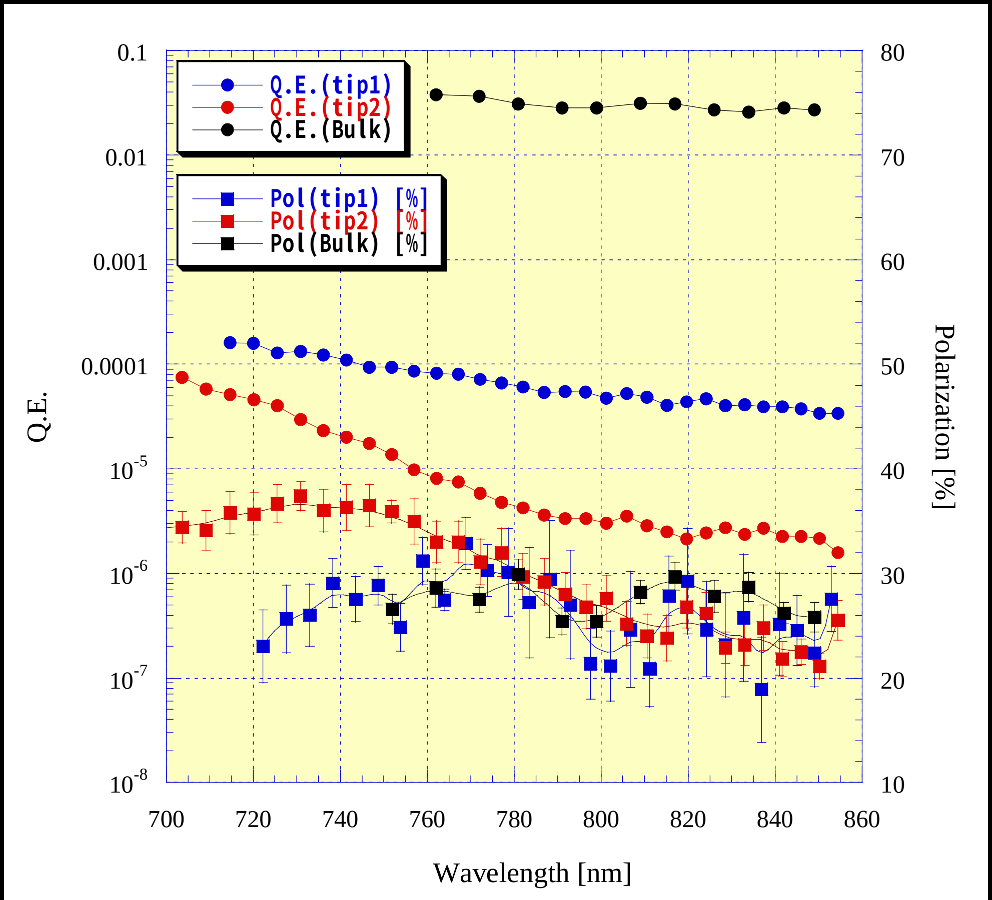


Q.E.低くなる（電子親和度大きくなる）と光電流発生の電界強度が大きくなる。
F-Nプロットで右下がりの直線に載る

（ニードルなしGaAs結晶では観測されない）

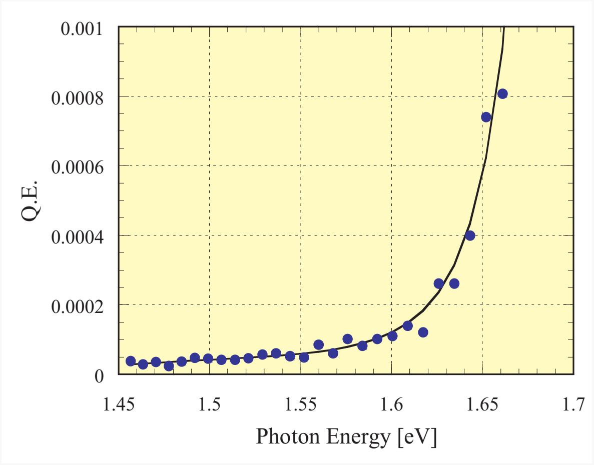
電界放出によるニードル先端からの光電流引き出しができている

Tip-GaAsにおける偏極度とQ.E.



Tip-GaAsからの偏極度は20%～40%の間であり、Bulk-GaAsに遜色ない性能である。

高電界下における光電流の励起エネルギー依存特性



横軸:励起エネルギー、縦軸:量子効率をとった光電流のグラフ
実線はWKB近似より求めたトンネル確率の式よりFittingしたもの

高電界による表面トンネル透過確率を反映した変化が観測されている。

Tip-GaAsの改良 (CNT付tip-GaAsの作成)

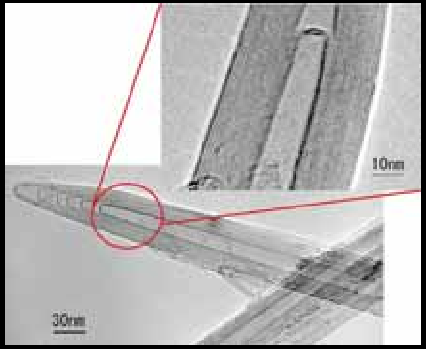
・電界放出による励起電子の引き出しに成功

偏極電子引き出し可能

・今回のニードル形状では
電界増倍効果が不十分 → カーボンナノチューブ(CNT)を利用する

〈CNTの特性〉

・形状
径・先端曲率が数十nm (0.7nm以上)
高アスペクト比を有する



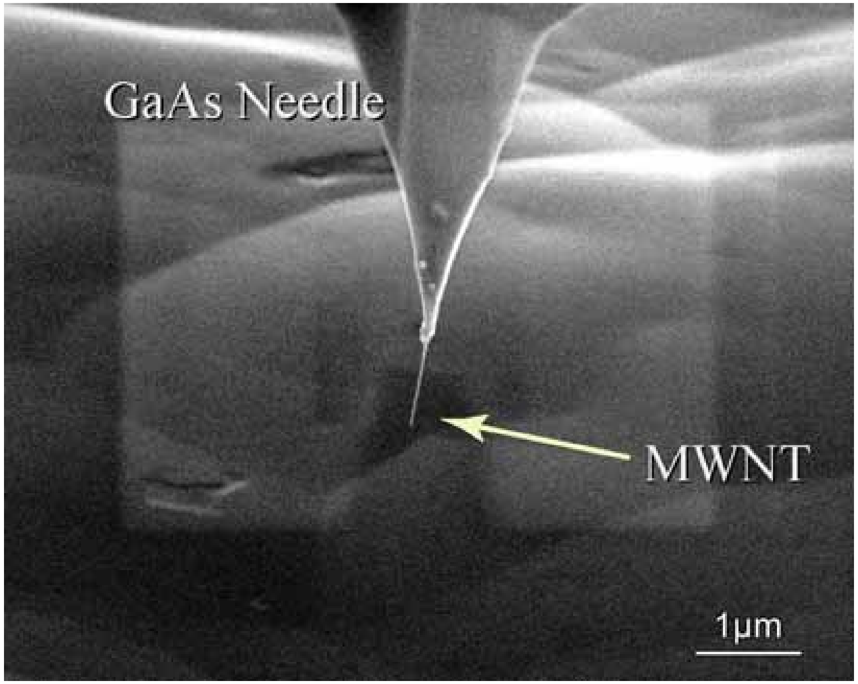
・量子細線の特性
二次元方向の量子閉じ込めにより
伝導電子が離散的なエネルギー分布を取る

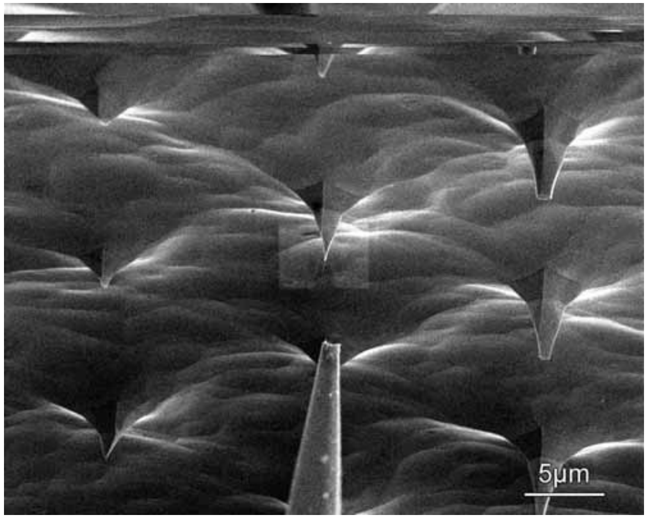
S.J.Tans et al. :Nature386,474(1997)

コヒーレント電子ビーム発生確認されている

Y.Saito and K.Hata :Jpn.J.Appl.Phys.39,271(2000)

作成したCNT付GaAsニードル





大阪府立大学･中山教授、秋田助教授　作成協力

CNT : MWNT 直径〜20nm

Tip先端から1μm突出させている。(カーボンによりtip-GaAs先端に固定)

〈まとめ〉

1. CNT無しGaAsニードルによる実験から電界放出での偏極電子取出しは可能である
2. 電界増倍効果を更に高めなければならない。このためCNTを利用。また、エッチングパターンについても改良中。
3. CNTと偏極電子生成技術を融合させ、新たな分野を開拓する。

(電子ビームを用いるものへの応用

STM,SEM,TEM,逆光電子分光・・・・)

〈今後の方針〉

CNT付きtip-GaAsの測定実験

1. 電界特性 (新型電子銃設計中)
2. 偏極度
3. エミッタンス測定

これにより、低エミッタンスの偏極電子源としての評価を行っていく。またCNTを介するスピン輸送現象についても、検討していきたい。