

15. 偏極電子ビーム

広島大学

LIPTAK ZACHARY

目 次

偏極電子ビーム

| | | |
|-----|------------------------|-------|
| 1 | はじめに | 15-1 |
| 2 | スピン偏極電子源の概念 | 15-1 |
| 3 | GaAs陰極とビーム生成過程 | 15-2 |
| 3.1 | 量子効率 | 15-2 |
| 3.2 | 半導体 | 15-2 |
| 3.3 | 直接遷移型半導体 | 15-3 |
| 3.4 | 歪み格子と歪み超格子 | 15-4 |
| 3.5 | NEA素過程 | 15-5 |
| 3.6 | カソード寿命と劣化の原因 | 15-7 |
| 4 | GaAs—NEA 偏極陰極の作成 | 15-8 |
| 4.1 | 切断 | 15-8 |
| 4.2 | 洗浄 | 15-8 |
| 4.3 | 台に乗せる | 15-8 |
| 4.4 | アクティブ化 | 15-8 |
| 5 | レーザー照射システム | 15-9 |
| 6 | スピン偏極方法の操作 | 15-9 |
| 6.1 | Wien Filter | 15-9 |
| 7 | DC 偏極電子銃 | 15-10 |
| 7.1 | Vent/Bake DC銃 | 15-10 |
| 7.2 | Load/Lock DC銃 | 15-10 |
| 8 | 偏極度の検出 | 15-11 |
| 9 | まとめ | 15-11 |
| | 参考文献 | 15-12 |

偏極電子ビーム

1. はじめに

スピン偏極電子ビームはバンチ内の電子の固有電気モーメント（スピン）状態が優先的に選択されたビームである。核物理や素粒子物理用の加速器を用いる実験はスピン偏極ビームで大幅に物理を精査することができる。例えば核構造[1, 2]、強い相互作用、電弱相互作用や暗黒物質や SUSY の様な標準模型を超えた新物理（BSM）[3, 4]等を偏極ビームで模索できる実験が提案されたこともある。

これまで、数十年間も偏極ビームを使用する加速器が開発され、数々の実験にビームを送った。それに加え、次世代の加速器においても偏極ビームを使用しようとする案も多い：日本の国際リニアコライダー、CERN の FCC-ee や中国の CEPC 等。米 EIC はスピン偏極電子ビームだけでなく、スピン偏極イオンビームとも衝突させる予定だ。

加速器における応用以外、スピン偏極電子ビームは別の分野でも興味を引いている。例えば、薄膜や表面磁性[5]、電子顕微鏡[6]等。

本講義ではスピン偏極電子源のメカニズムや標的の構成を紹介する。主により多く使用されている GaAs 直接遷移型半導体の標的を叙述する。それに関して、標的の偏極電子放出の素過程、効率を高くする技術進化の詳細、作成する方法や歴史を述べる。レーザー照射システム、スピンローターと電子銃についても紹介する。

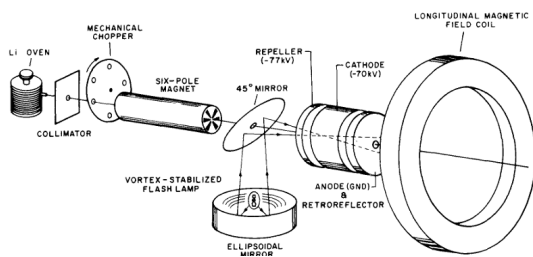


図 1 初期偏極電子源 PEGGY の構造。

2. スピン偏極電子源の概念

円型加速器のストレージリングに回る電子は Sokolov-Ternov 効果[7]で自己偏極化されるものの様な利益を用いる加速器は限られている。線形加速器、ビームの寿命が不十分なストレージリングや偏極方向を変更する機械はこの効果を

使用できない。その場合、偏極ビームを直接生成できる電子源が必須となる。

初めての偏極電子ソースは 1930 年代に提案されたが、1971 年には初めて加速器用のスピン偏極電子源が開発された[8]。イェール大学が開発した PEGGY と呼ばれる電子源が 1974-1979 年の間に SLAC において使用され、スピン状態で区分けした ${}^6\text{Li}$ 原子ビームから光イオン化した電子を生成することに成功した。その時代 SLAC にあった加速器が必要とした $1.6\mu\text{s}$ パルスの中に 85% 偏極度を出せたけれども、最高電流は $\leq 25\text{ mA}$ であり、偏極方向を変更するのは遅かった。それに不安定であったため、タイムロスもかなり多かった（数年間、 $\sim 50\%$ 運動効率マックス）。図 1 は PEGGY の構造を示す。

また、同じく 70 年代後半、様々な偏極ビームの生成方法が提案されたが、主に加速器に使われる物があまり現れなかった。本講義ではこの電子源については説明を割愛する。

1974 年、GaAs という半導体から偏極電子を出せる可能性が述べられた。実際に実験を行ったところ、GaAs 結晶に蒸着した Cs-O 薄膜カソードが光電効果で刺激され、予想以上の偏極度が測定された[9]。低電圧でその結果が見られてから SLAC がすぐに高電圧電子銃を開発し始め、その後 1978 年に実現した。この電子銃で出された 16-22 GeV 電子が重水を照射したことで、ワインバーグ=サラム理論のパリティ非対称が証明され、標準模型の証となった[10]。

それ以来、GaAs 陰極電子銃が世界中の加速器に普及するようになり、定番となった。1980 年代にはドイツのボン大学やマインツ研究所、米 MIT (マサチューセッツ工科大学) が偏極ビームを生成した。

SLAC では、1981 年から 1990 年代まで暫く偏極ビームの生成を中止したが、1992 年には新たな GaAs 電子銃が開発された。

1990 年代から 21 世紀に亘り、GaAs 陰極の難点を克服しようとする研究がし続けられていた。偏極度、ビームの寿命、量子効率をより高くするため、名古屋大学、米ジェファーソン国立研究所等で研究が行われ、GaAs 陰極改善がなされた。その上で、GaAs 結晶の格子を歪ませ、偏極度の期限を突破したり、薄膜をつけて電子放出の確率を改良したりするような方法が開発され、偏極度、量子効率、耐久性がより良くなった。

3. GaAs 陰極とビーム生成過程

現代、主に使用しているビーム生成方法は GaAs 結晶に基づく陰極である。GaAs というのは、光電効果で偏極電子を生成できる半導体である。この章では、半導体から電子を打ち出せる素過程を紹介する。

理想的なスピン偏極陰極は 3 つの条件を満たす：

- i.) 偏極度が高い
- ii.) 適切な電流を出せる
- iii.) 寿命が長い

上記の 1.) の偏極度は、 \uparrow と \downarrow の 2 つのスピン状態、 $N\uparrow$ (\downarrow) は \uparrow (\downarrow) 状態の電子数を用いながら、

$$P = \frac{N\uparrow - N\downarrow}{N\uparrow + N\downarrow} \quad (3-1)$$

で定義する。その式を鑑みて、 \uparrow も \downarrow も丁度同じ数がある場合、偏極度が 0 ; 逆に一つの状態 (\uparrow 又は \downarrow) しか存在しない場合、偏極度は 1 (即ち 100%) となる。

バルク GaAs 半導体の場合、理論上の最高値は 50% (即ち 3 : 1 の状態比率) だが、様々な要因のため、実際の値はそれより低い。バルク GaAs より最近の技術では、その比率をより高くすることも可能となった。

3.1. 量子効率

光陰極に光を照射する度に電子が放出されるが、陰極の性能を比較できるようなパラメータを定義することができる。そして、物質ごとに光を吸収する分布が違うため、波長によって電子量が異なる。簡潔にいうと、入射する光子の数によって何個の電子が放出されるか、という量を定めたい。

この値を量子効率と呼び、 η で書くようにする。だとしたら、その比率は

$$\eta = \frac{N_e}{N_\gamma} \quad (3-2)$$

と定義される。 N_e と N_γ は電子数と光子数を表す。電子数でなく、放出する電流 I で表すなら、

$$I = e\eta N_\gamma \quad (3-3)$$

この値を直接測定するのはあまり現実的ではないため、実際に測れる値にしなければならない。光電効果によるビーム電荷 Q で定義すると、

$$Q = \frac{\eta e P_L \lambda_L}{hc} \quad (3-4)$$

となる。この式における P_L はレーザーのパワー (出力)、 λ_L はレーザーの波長を表す。 h と c はプランク定数と光速である。上記の式を測定すると、

$$Q[\text{nC}] = 8.08 \times 10^{-3} \eta[\%] P_L[\mu\text{W}] \lambda_L[\text{nm}] \quad (3-5)$$

で提示される。

3.2. 半導体

第 2 章で述べた最近の偏極ビーム源は基本的に光電効果を使える半導体を基盤にしている。半導体という材質は導体 (例えば金属) と絶縁体 (例えばセラミック) の中間の抵抗率を持っている材質である。金属と違って、温度が上がると共に抵抗率が下がる。ドーピングという異物を半導体バルクに入れる技術を使用すると抵抗率のプロパティなどを変更できる。その異物は一般的にかなり少量である。例えば 10^{-8} 程度。

同じ半導体結晶の中にドーピング量が異なる範囲が存在する場合、半導体接合が現れる。半導体接合で電子又は + 電荷を持っているホール (正孔) の流れが影響を受ける。例えば、電流が一方通行になる効果がトランジスタの基本である。

電子は量子力学によって半導体の格子の中に限られている順位でしか存在できない。その順位は波動関数に決められている。電子はフェルミ粒子であるため、パウリの排他原理によると、同じ状態で存在できない。しかし、僅かに離れているエネルギー順位が集まる状態が現れる。これをバンド (帯) と呼ぶ。

物質から電子を取り出すエネルギーはフェルミ順位という値である。フェルミ順位とバンド構造によると、物質が導体、半導体か絶縁体になる。導体の場合、フェルミ順位はバンドの中にあり、半導体の場合はバンドとバンドの間にあるが、バンド近辺にある。バンドから遠く離れている場合は絶縁体になる。

原子の中の電子軌道と同様に低エネルギー状態からバンド構造が満たされる。最後に電子が入っているバンドは価電子帯 (Valence band) と呼ばれる。金属などの導体物質では、価電子帯は隙があるので電子が自由に移動できる。即ち、マクロレベルで電流が簡単に流れることができ、抵抗率が低いというわけだ。半導体の場合には価電子帯が満載のため、金属ほど電流が流れない。

価電子帯は最後の電子が入っている順位だが、その上にもバンド構造が存在している。次のエネルギー順位は伝導帯 (Conduction band) と呼ばれる。そこには一般的に電子 (又は正孔) が入っていないが、エネルギーを与えられた電子は励起され、価電子帯から伝導帯へ移動できる。その励起された電子はフェルミ順位よりエネルギーが高く、表面から取り出される。

半導体物理学の詳細は、参考[11]等に著されている。

3.3. 直接遷移型半導体

GaAs は直接遷移型半導体である。つまり、結晶の Γ ポイントにおける価電子帯のピークエネルギーは直接伝導帯の最低エネルギー順位の下にある。

3.3.1. GaAs のバンド構造と電子放出

図2は GaAs のバンド構造を表している。図の下の方を見ると、価電子帯近辺に幾つかのバンドが集まっていることが明らかである。価電子帯の最高値に2つのバンドが隣接して縮退状態となっている。図の中でそれらは Heavy Holes と Light Holes と表されている。

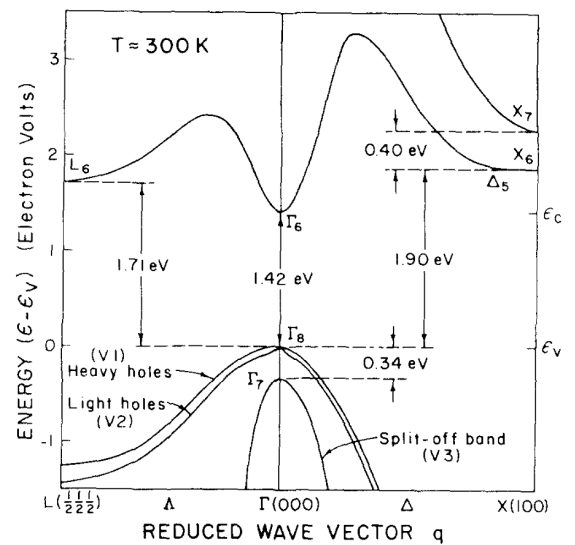


図2 GaAs の価電子帯と伝導帯付近の詳しいバンド構造 (拡大) [12]。X6 と書かれている線は伝導帯を表す。1.42 eV バンドギャップの下に価電子帯の縮退状態が見える: Heavy Holes と Light Holes で表されている線が最高値で重なっている。

価電子帯と伝導帯は 1.42 eV のバンドギャップで離れている。伝導帯へ電子を移動させるため、レーザーでエネルギーを与えて励起させることができる。特に、カソードが円偏光レーザーに照射された際、決められたスピン状態が選択される。偏極方向を変えるため、レーザーの円偏光を反対にすると反対側の状態が選択されることになる。

電子のエネルギー順位は角運動量を持っている。GaAs の価電子帯は角運動量 3/2 を持っており、伝導帯は角運動量 1/2 を持つ。円偏光レーザーは ± 1 の角運動量を与える故、価電子帯から伝導帯へ遷移させることは可能だ。しかし、ドーピングされてない GaAs のバンド構造では、価電子帯の近くに重なっている Heavy Holes と Light Holes バンドの縮退状態による、一つの順位から移動させるのは難しくなってしまう。

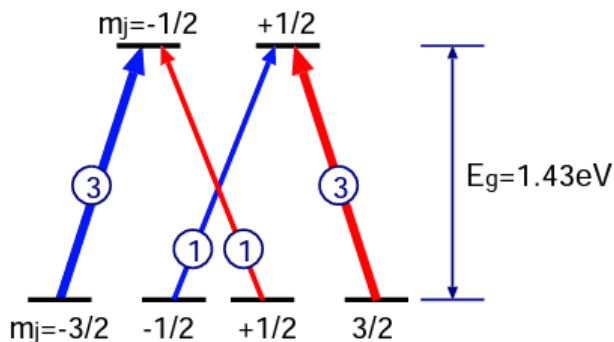


図 3 バルク GaAs の価電子帯と伝導帯の構造。価電子帯の $m=\pm 3/2$ と $m=\pm 1/2$ が縮退状態にある。伝導帯への励起確率は矢印に表されている；太い線は細い線より励起確率が高い。Eg はバンドギャップエネルギーを示す。

重なっているバンドの m 状態が問題となる。Heavy Hole は $m=\pm 3/2$ を持ち、Light Hole は $m=\pm 1/2$ を持つ。量子力学に従って、遷移確率を計算すると

$$m = \pm 3/2 \rightarrow \pm 1/2 : 3/2 \quad (3-6)$$

$$m = \pm 1/2 \rightarrow \mp 1/2 : 1/2 \quad (3-7)$$

ということで、 $m = 3/2$ の Heavy Hole バンドから $1/2$ の伝導帯への遷移確率は $m = 1/2$ の Light Hole より 3 倍だが、縮退のため優先的に選択できず、確率を 50% 以上にできない。偏極度をより高くするため、その縮退状態をなくさないといけなくないのだ。その問題を解くのは次章のテーマとなる。図 2 にはこの縮退状態が見えられる。

GaAsP と GaAs の格子の差が歪みを誘発する。格子の歪みを起因として、 $P_{3/2}$ 順位の $m = \pm 1/2$ と $m = \pm 3/2$ 状態の間にエネルギーギャップが生じ、 $m = \pm 1/2$ 順位からの励起が抑制される。歪み格子 GaAs から、85% 以上の偏極度を測定することができた。

1990 年代前半、GaAs の 50% 期限を突破する手段が実現した [13, 14]。図 3 に表してある価電子帯の Light Hole と Heavy Hole 縮退を解くように、GaAs が GaAsP の薄層の上に作られる。

歪み格子の高偏極度とともに、量子効率が落ちてしまう。例えば参考 [13] の結果を参照すると、 $0(10^{-4})$ しかないことが分かる。

3.4. 歪み格子と歪み超格子

歪み格子以外に、他に偏極度を高める方法もある。似たような半導体を交互に重ねて超格子を作るという手段もある [16]。GaAs を例にすると、GaAs, GaAsP, GaAsIn, GaAsAl 等を交互に重ねることで、更に歪みを誘発させるができる。層は一つずつ 5-10 nm 程度であり、通常 2 つの材料を組み合わせる。例えば、GaAsP—GaAs の超格子が一般的である。

歪み格子層と超格子層を同時に使い、歪み超格子という結晶構造を生み出し、90% 偏極度かつ量子効率 1% 程度を出すことに成功した。

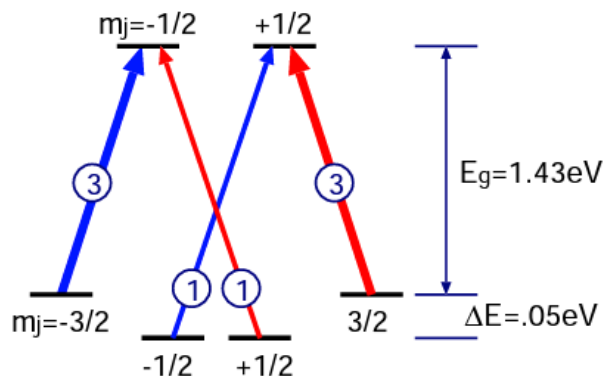


図 4 歪み超格子の価電子帯と伝導帯のバンド構造。歪みの影響で価電子帯の縮退が解かれ、 $m=\pm 3/2$ と $m=\pm 1/2$ の間に 0.05 eV の差が生じた。

図 4 に示されたように、格子の歪みによる、 $\Delta E = 0.05$ eV の差が誘導される。その差のおかげで優先的に励起確率が高い方の $m = \pm 3/2$ バンドを選択することができるようになる。歪み超格子の構造は図 5 (イラスト) と図 6 (電子顕微鏡画像) に示される。なお、図 7 は歪み超格子の層の数と偏極度の関係を表す。

表 1 に GaAs の歪み格子、歪み格子の様々な材料の組み合わせが表してある。その表を参照すると偏極度が高いものの量子効率がまだ低いのが分かる。いくら偏極度が高くとも、量子効率が不十分な場合は必要な電流を出すことができない。また、最善のケースで測定すると量子効率が 1% 以下であれば、カソードが劣化するとともに量子

効率が更に悪くなる。入射する光子は主に熱になってしまい、それが劣化を加速させる。

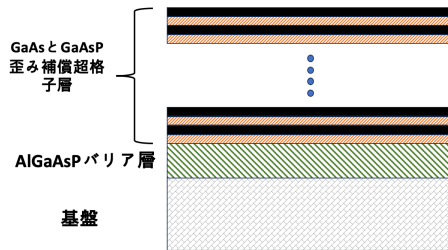


図 5 歪み補償超格子の構造。バリア層の上に歪みを誘導するペア層 (GaAs と GaAsP を交互に重なっている層) が歪みを誘導する。バリア層は数百 nm 程度の厚さ。

そのため、必要なレーザーパワーが小さければ小さいほど劣化が遅くなり、カソードの寿命が延びることになる。

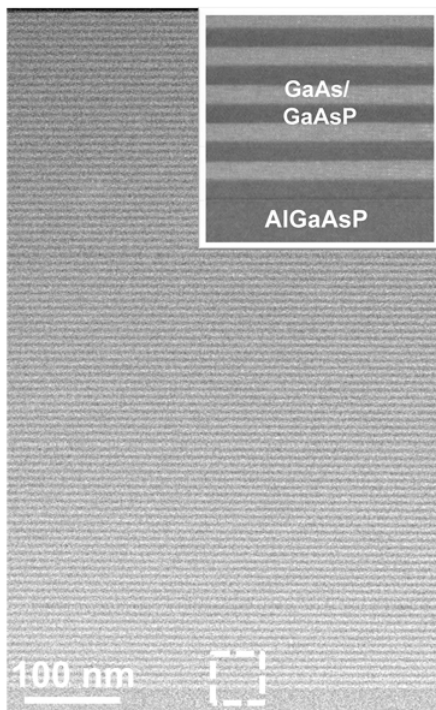


図 6 歪み補償型超格子の透過薄層の厚さは電子顕微鏡スキャンによると約 50-100 nm 程度。AlGaAsP バリア層の上に 90 層ペアが重なっている [15]。

歪み超格子の場合は、レーヤー数を増せば増やすほど歪みが段々緩和され、量子効率が落ちる。歪みによるストレスを維持するため、バリア層を

かけ、その上に歪み超格子をつけると偏極度を保ちつつ量子効率を高くできる。それを歪み補償型超格子カソードという。図 8 がこの 24 ペア層と 12 ペア層の歪み補償型超格子の偏極度と量子効率を表しているが、780 nm で 24 ペア層は 92% 偏極度を出しながら 1.6% の量子効率を打ち出すことが分かる。

表 1 の値に比べると量子効率が比較的高い。特に偏極度 9 割の InGaAs-GaAs カソードを例にすると、量子効率が桁違い増えた。

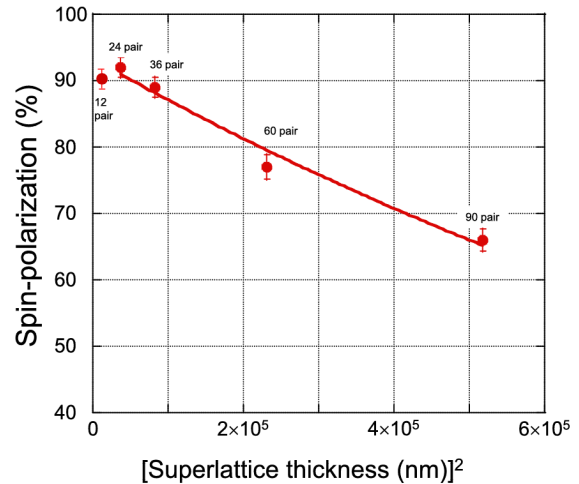


図 7 超格子の厚さと偏極度の関係 [15]。24 ペア層まで偏極度が増えるが、それより厚くすると逆に減ってしまう。

また、量子効率の問題を解くために DBR (Distributed Bragg Reflector) という手段も開発された。DBR とは、GaAs カソードに光を多重反射させて、吸収率を高めるような表面を作る技術のことである。DBR により、高偏極度 (> 80%) を保ちながら 6% 以上の量子効率が実現している [18]。

3.5. NEA 素過程

これまで伝導帯へ偏極電子を励起する手段を説明したが、伝導帯から DC 銃の真空容器へ電子を放出させないと全部が水泡に帰す。円偏光レーザーから入射した光子は主に数百 nm のうちに吸収され、その程度の領域に電子が励起される。励起された電子が対称に放散する。表面まで辿り着く電子は、GaAs の表面と真空の境にある電子親和度 (Electron affinity) というポテンシャルバリアにぶつかってしまう。

p-ドーピングを用いて結晶中のフェルミ順位を下げる。同時に、p-ドーピングが表面における伝導帯の順位をも下げ、電子を放出させやすくする。この2つの効果のおかげで電子親和度が減るものの、それだけでは十分でない。

表 1 歪み超格子の偏極度と量子効率[17]

| 陰極類 | 偏極度 (%) | 量子効率 (%) |
|---|---------|----------|
| Str. GaAs on GaAsP | ~85 | ~0.1 |
| Str. GaAs w/ DBR | ~85 | ~1.0 |
| Superlattice (GaAs-AlGaAs) | ~70 | ~1.0 |
| Strained layer superlattice (InGaAs-GaAs) | ~90 | ~0.05 |
| Strained Layer superlattice (InGaAs-AlGaAs) | 75-85 | 0.1-0.5 |
| Strained layer superlattice (GaAs-GaAsP) | ~80 | ~0.3 |

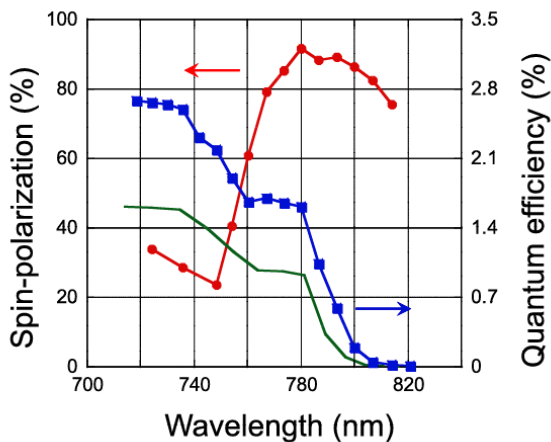


図 8 歪み補償型超格子の偏極度（左側縦軸）と量子効率（右縦軸）分布。24層ペアの偏極度は赤い丸、量子効率は青い四角、12層ペアの量子効率は緑線で表している[15]。

ドーピング以外に、更にポテンシャルバリアをなくす必要があるのだ。

真空へ効率的に電子を放出するために、GaAs結晶の表面に薄膜を吸着する手段が発達された

[9]。その薄膜の構造は図9で表される。薄膜の伝導帯は真空の順位より低く、電子を出しやすくさせる効果がある。真空より伝導帯のポテンシャルが低い状態は負の電子親和度(Negative Electron Affinity, 省略 NEA)と呼ばれている。図10にp-ドーピングと薄膜の負の電子親和度の素過程が描いてある。

初期の薄膜構造はCsと酸素化する1層だけだったが、近年では他の材料を使って薄膜のプロパティを改善しようとしている。特に、初期のCs-O薄膜の寿命はかなり短いため、耐久性の高いカソードの開発を目指している。例えば、Csを用いながら、アルカリ素を使用するとカソードの寿命が比較的長くなる。表2を見ると薄膜の材料の構造を比較することができる。

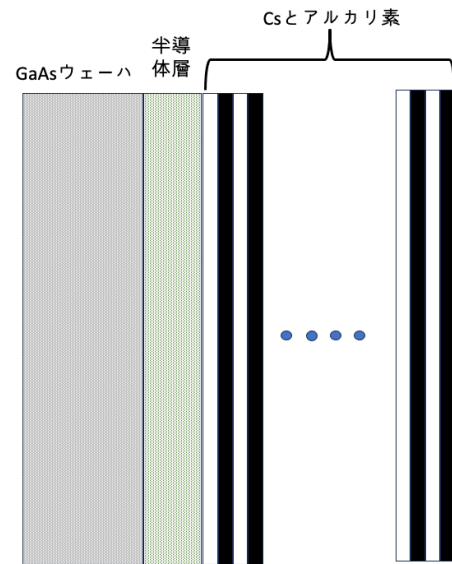


図 9 NEA 薄膜の構造。GaAs ウェーハの上に半導体素 (e. g., Sb や Te) が蒸着され、その上に数ÅずつのCsとアルカリ素の層も蒸着してある。

近年、NEA 薄膜を蒸着する際、数 nm ほどの半導体層を先に付けると量子効率が上昇すること

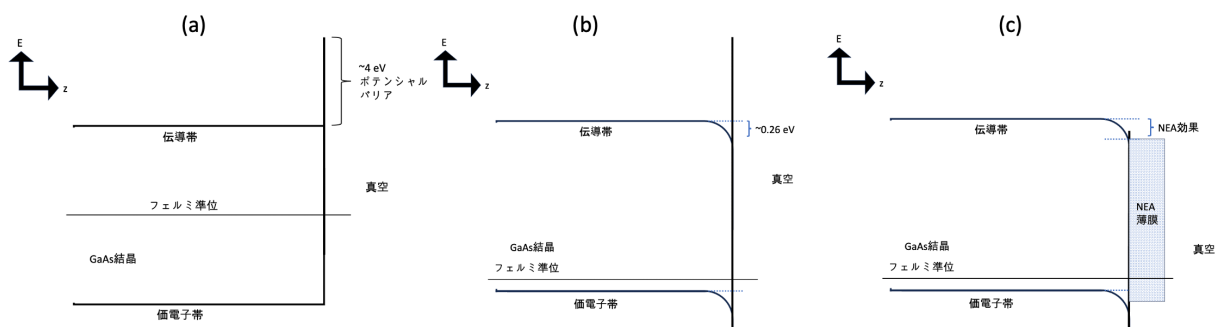


図 10 NEA の素過程。(a)はバルク GaAs 結晶。(b)p-ドーピングした GaAs 結晶。ドーピングの故にフェルミ順位が下げられ、表面近辺のバンドベンディングが現れた。しかし真空とのバリアが残り、電子を放出する確率が低くなる。(c) NEA 薄膜が蒸着した状態。蒸着した薄膜のため、ポテンシャルバリアがなくなり、電子を放出することが可能である。

が確認されている。例えば、Te[19]やSb[20]を用いたら、以前より 5-7 倍程の改良がみられた。

表 2 NEA 材料の比較。Cs-O より Cs-K-Te の寿命は桁違いの差があきらか。

| NEA 材質 | 寿命 (10^{-3} Pa · s) |
|---------|------------------------|
| Cs-O | 0.29 ± 0.03 [21] |
| Cs-O | 0.40 ± 0.02 [22] |
| Cs-K-Te | 6.50 ± 0.01 |

3.6. カソード寿命と劣化の原因

カソードを使えば使うほど、様々な原因でダメージを被って衰えてしまう。その劣化が進む度、量子効率や偏極度が下がり、効果を悪化させる。最終的には加速器のパラメーターを満たせなくなり、カソードを交換するか再びNEAをアクティブ化しないといけないことになる。加速器を運転している間は、なるべくタイムロスを減らすべきであるから、その交換や再アクティブ化の時間をできる限り延ばすことが重要である。

主に量子効率を劣化させる過程は3つある[19]：陽イオンの逆流(ion back-bombardment)、熱脱離(thermal desorption)と残留ガスの吸収(chemical poisoning)だ。

陽イオンの逆流は電子ビームでイオン化されたガス分子が DC 銃の電場でカソードへ加速されて表面に衝突するプロセスである[23]。イオン化された分子は電場の中央へ漂いながらカソード表面に引かれるから、主に同じような位置で衝突する。陽イオンは電子より遥かに質量が多いため動きが遅く、電子が放出される位置は電場中央と

異なる場合、その二箇所の上に「溝」の形を描く。図 1 1 でその溝が明らかに見える。

運動量による、陽イオンの逆流は様々な方法で量子効率を劣化させる[20]。高エネルギーイオン(>5 keV)はGaAs結晶の原子を動かして格子にダメージを与える。中エネルギー(500 eV - 5 keV)は表面の原子と衝突してNEA層を飛ばす(sputtering)[24]。低エネルギーイオン(<500 eV)はカソード表面を歪ませ、電子放出を妨げる。その3つのプロセスの詳細はまだ未確定であり、研究がし続けられている。

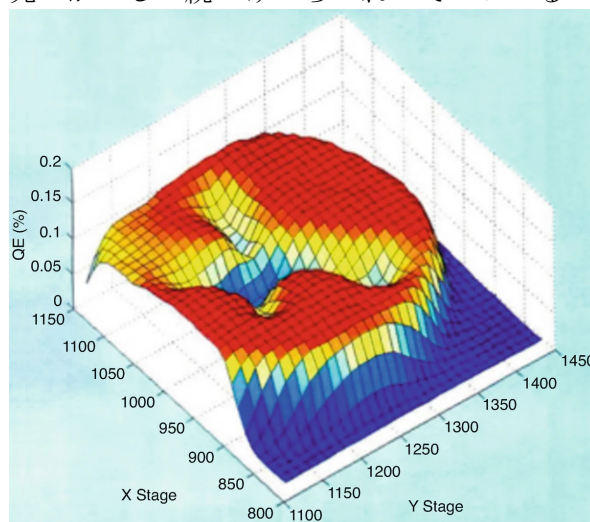


図 11 使用済みカソードの測定された量子効率。陽イオンのダメージの故、量子効率が落ちる。電子放出の位置と電場中央の間の「溝」は幾つか見える[25]

残留ガスの吸収は、NEA 表面が真空容器に残っているガスと科学的に反応するプロセスである。そのプロセスが進む度、NEA 薄膜の効果が劣化す

る。陽イオンの逆流も残留ガスの吸収もどちらも真空容器にあるガスに正比例するから、容器の真空を維持することは非常に重要である。

先に述べられたプロセスが量子効率を落としていっているが、常に同じ電流を出すためには更にレーザーの出力が必要となる。照射している光子は熱へ転換され、カソードの温度を上げて NEA 表面の原子を外してしまうと思われる。それは熱脱離というプロセスである。

4. GaAs-NEA 偏極陰極の作成

前章で説明された NEA-GaAs 陰極を作成するプロセスはかなりデリケートである。数百 nm 程度の厚さであるが故、結晶内のストレスを保つのに慎重でなければならない。また、崩れたり汚したりする機会も多い。

4.1. 切断

歪み補償型超格子 GaAs 結晶は企業から購入できるため、結晶のクオリティや純度は高いはずである。しかし、企業で販売している結晶ウェーハはカソードが必要なサイズより大きいため、適するサイズと形に切る必要がある。切断する面以外に表面を触らないように切断道具（例えばダイヤモンド錐）で適切なサイズに切る。

4.2. 洗浄

真空容器に入れる前に結晶ウェーハを洗浄して汚物を取る。研究所によって詳細が異なるが、概ね以下の通りである：

- i.) 洗浄用アセトン液体に浸す
- ii.) 純水バスに 2、3 回浸す
- iii.) エタノールリンスで濯ぎ、残るエタノールを蒸発させる

4.3. 台に乗せる

次に、結晶ウェーハの位置を固定させるため、台の上に乗せる。In 半田で台とウェーハを接着し、その上に端を覆うように金属マスクをつける。

台に定着したウェーハが図 1 2 に表される。

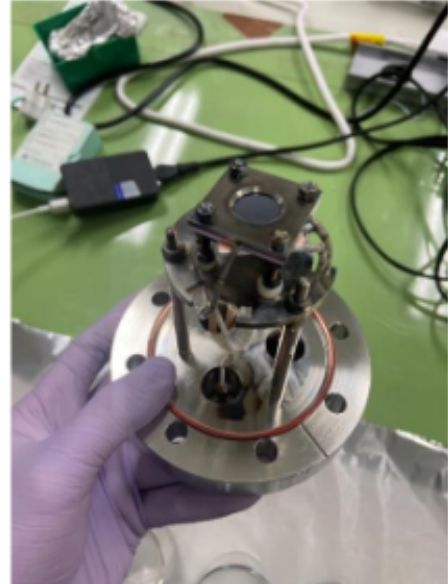


図 12 真空容器に入れる前の台。洗浄したウェーハが上に半田付けされ、金属マスクに覆われている。

ウェーハの位置を固定するため以外に、マスクは端近辺の電子の放出を防ぐ役割もある。端から放出される電子はうまく加速されず、不正な軌道で動き、壁又は DC 銃の陽極に衝突して真空状態を崩してしまうことがある。ウェーハを接着したら、真空容器に入れることができる。図 1 3 は真空内容の様子を示す。

4.4. アクティブ化

GaAs 結晶と NEA 材料が真空容器に入っている状態で粗排気ポンプを使い、容器内の気圧を下げる。気圧が 10^{-4} Pa ほどに至ったら、真空容器の加熱（ベーキング）を始める。均一に全体を 200°C まで加熱する。通常、加熱した状態を 80 時間前後維持したのち、ポンプへのバルブを閉じ、イオンポンプをつける。NEG ポンプもアクティブ化し、数時間程度で 10^{-8} Pa、あるいは更に低気圧まで落とすことができる。

カソードの表面に残っている排出したガスを取るため、2 時間程度 500°C になるまでカソードを加熱し、常温に戻す。常温の状態になれば、

電圧をかけたままで NEA 材料を蒸着できる。蒸着する際に、カソード表面に交互に材料を接着させる。目指す量子効率に至るまで、層の段を付ける。

- 薄膜の厚さを調整する方法は2つ存在する：
- i.) 蒸着している間、光を照射し、光電効果の電流を測定する。光電流が落ちるならば、その層での蒸着を中断して次の層へ進む
 - ii.) 薄膜コントローラーを使用する

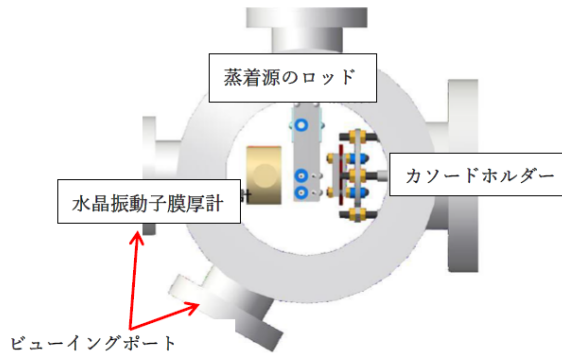


図 13 真空内容の挿絵。カソード台と薄膜コントローラーの間に薄膜材料ディスペンサーが置かれている。光がビューポートから入射してカソードを照らす。

上記の ii.) の薄膜コントローラーはピエゾ効果結晶を用いて薄膜蒸着の厚さを測定する道具である。その道具をカソード台の反対側に設置し、カソードと同様に薄膜を接着させる。

結晶の固有振動の頻度は蒸着した量によって変わるため、その頻度を測定すると厚さが明らかになる。精密な測定をするためには薄膜材料ディスペンサーが左右に均一に蒸着材を出すことが重要だ。コントローラー結晶の振動頻度は5—6 kHz が一般的である。薄膜の厚さは Å レベルの精密さで測れる。

5. レーザー照射システム

節 3.3 で述べたように、GaAs のバンドギャップエネルギー近辺の円偏光レーザーで照射すると偏極電子が優先的に放出される。GaAs の場合、バンドギャップは 1.42 eV であるから、 $hc/1.42 \text{ eV} \approx 870 \text{ nm}$ より少し短い波長が必要となる。通常、780–850 nm レーザーが用いられる。企業から問題なくこの辺の波長レーザーを購入することができる。Ti:Sa レーザーはこの範囲の波長を出せ、多く使われている。

RF ビームラインに使えるビーム構造を作るには DC レーザーを使用するのは不可能ではないが難点が幾つかある。RF ビームラインに合わせるために、パルスパンチャー又は RF チョッパー [25, 26] という手段が存在するが、理想的ではない。パンチャーはエネルギー Spredd を導入し、チョッパーはビームを捨ててしまうから効率が悪い。

それより、同期入射する手段が幾つかある。RF 位相に合わせたレーザーパルス陰極に照射して RF と一致した構造ビームを作る方が効率的である。パルス幅は数十 ns 程度が普通。このようなモードロックというレーザーの出力は比較的高く、GHz で稼働できる [27, 28]。

もう一つの手段は gain-switching と呼ばれる。この場合、ダイオードレーザーにサインウェーブを与える。サインウェーブで頻度とパルス幅が決められるが出力が低い。100 mW 程度以上のパワーが必須の場合、特別な技術やテレコム用のファイバー線が必要となる [29, 30]。

6. スピン偏極方法の操作

レーザーで励起した電子の偏極ベクトルはビームの方向と（逆）平行のままで生成される。しかし、一般的に偏極ビームを使う際、指定している方向で送らなければならない。通常、これはビーム運動方向に平行である。

6.1 Wien Filter

ビームが加速器のエレメントを通る度に水平面で歳差運動する (precess)。それに、円型加速器のストレージリングを回る場合、ベンディング磁石の磁場に対してスピンベクトルが直角で回転されるので垂直方向で維持され、衝突点の前後へ回転するシステムが必要となる。

生成する時、歳差運動をなくすため、一般的に Wien Filter という道具が使用される [31]。

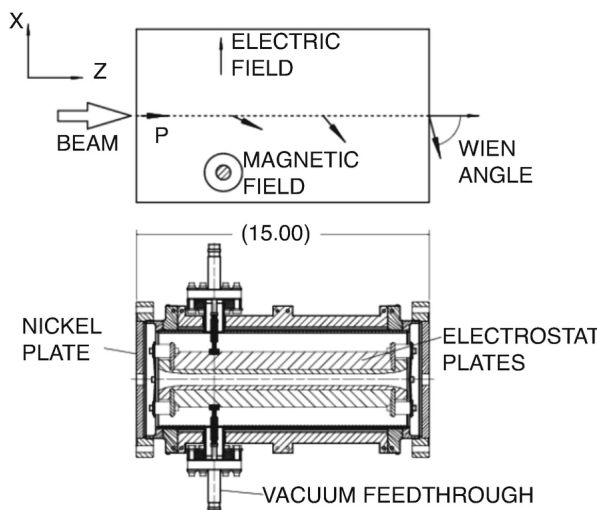


図 14 米ジェファーソン国立研究所の CEBAF の第 2 と第 3 偏極電子源に使用されている Wien Filter. 下の図には磁石が省かれている[31]。

Wien Filter とは、静電場と静磁場を垂直に発生させる道具である。電場も磁場もビーム粒子の進行方向に垂直である。その電磁場の中で、電子はローレンツ力 $\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$ を感じられるが電場と磁場の効果を反対にしてなくすることができる。具体的に、電子の速度を

$$\beta c = E/B \quad (6-1)$$

で入射するとローレンツ力が 0 になり、電子の軌道が変更されない。

電子の運動が変わらなくても、Wien Filter の中の磁場が電子のスピンを電場の面に回転させる。図 14 は米ジェファーソン国立研究所の CEBAF に使われている Wien Filter を表している。この Filter では、100 keV 電子のスピンベクトルを $\pm 110^\circ$ 回転させることができる。詳細は[31]を参照。

7. DC 偏極電子銃

光電効果 DC 銃は主に 2 種類ある：Vent/Bake と Load/Lock。本章でその 2 種類を紹介し、それぞれの利点と欠点を述べる。

7.1 Vent/Bake DC 銃

Vent/Bake DC 銃は名前の通り、カソードを交換する度に真空をなくして常圧に戻し (Vent)、カソードを入れてから加熱する (Bake) 必要がある。Vent/Bake 銃には、アクティブ化の蒸着材やコントローラー、高電圧源と真空装置が同じ容器に備

わっている。このシステムは比較的作りやすいが、すべてのコンポーネントが同じ容器に入っていることは様々な問題を引き起こす。当然なことに、毎度陰極を交換する際、数日間の加熱をしなければならないのはかなりのタイムロスになる。特に、スピン偏極陰極は耐久性がまだ理想的でないため、この問題の解決が急務だ。

タイムロス以外に、電子銃のコンポーネントにも難点が見れる。例えば、アクティブ化しているうちに、NEA 蒸着材が GaAs ウェーハだけでなく、陰極電極にも蒸着してしまう。この蒸着が進むといずれ電界放出が起こってしまい、電極のクリーニング又は置換を必要とさせてしまう。クリーニングも置換もかなりの時間を要し、その間に貯まる水分を出すために加熱が更に長くなってしまふのは非常に大変だ。

また、頻繁に真空容器を加熱するとフランジ、ガスケットなどのパーツが酸化してしまう可能性があり、酸化した部分が真空容器に入ってしまうことがある。耐熱フランジ等を選択するとこの問題が緩和される。

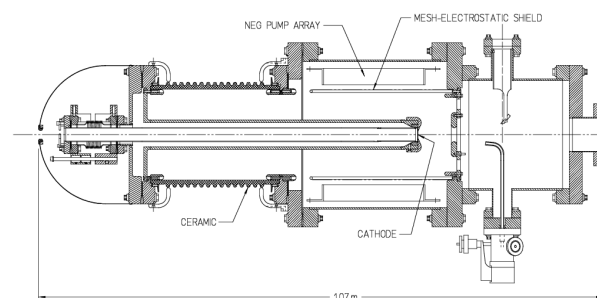


図 15 CEBAF で使用された Vent/Bake DC 電子銃[31]。

図 15 は米ジェファーソン研究所/ CEBAF で使用していた Vent/Bake DC 電子銃を表す。

7.2 Load/Lock DC 銃

Vent/Bake DC 銃の問題を解決するため、Load/Lock というデザインが用いられる。Vent/Bake デザインと違い、全部のコンポーネントは同じ容器に備わっていない。代わりにバルブで隔たれている別容器があり、常圧から真空へステップアップされたデザインである。

重要なポイントは、アクティブ化のプロセスは電子銃の電極と同じ空間でしないことである。真空内は常圧に接触しないから、交換する時に加熱せず新しい陰極を使うことができる。それに、

NEA 蒸着材は電極と一緒に蒸発させられない故に汚す恐れがなく、電界放出も起こらない。

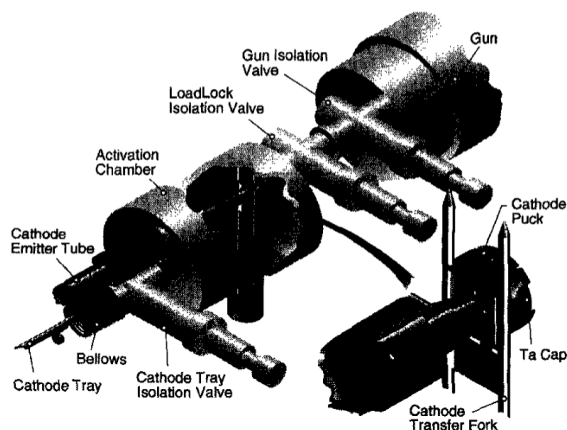


図 16 SLAC の偏極電子源に使用していた Load/Lock DC 電子銃。左下の容器にカソードがアクティブ化され、置換する時に右上の容器へ移される。容器はバルブで隔たれているから電極は常圧と接触せず、交換する度に加熱する必要がない。

Vent/Bake のデザインの問題を回避するため、多くの研究所は Load/Lock デザインを使用する。図 16 は SLAC で使用していた Load/Lock を例として表している[32]。

8 偏極度の検出

最後にスピン偏極度の測定を紹介する。生成したビームを実験に使うなら、どの割合が偏極しているかを把握しなければならない。偏極の検出についての詳細は本講義では概念のみを叙述する。

低エネルギービーム及びビームを生成した時点で偏極度を検出するなら、主に Mott 電子スピン偏極検出器 (Mott Polarimeter) が使われる。この検出器は eV~MeV 程度の電子に用いられる。

Mott 電子偏極度検出器の中のターゲットに電子ビームを入射し、ターゲット膜に背面散乱した電子の非対称を測定する機械である。再び↑と↓の方向で定義をしたら、その非対称は式 (3-1) に関係がある。検

出器に測定された電子数を N で定義すると非対称は

$$A = \frac{N\uparrow - N\downarrow}{N\uparrow + N\downarrow} = S_{eff} \times P \quad (8-1)$$

に表されている。

式 (8-1) で P はビームの偏極度 (式 (3-1)) であり、 S は検出器の Sherman 関数である。Sherman 関数は検出器の構造により計算できる関数[33, 34]だが、現実的にシミュレーションやカリブレーションでしか知られていない。

Mott 電子偏極検出器の詳細は参考書[35]で参照する。

数 MeV 程度以上の電子偏極度を検出する機械もある。例えば、高エネルギーコライダーで衝突点周辺の偏極度を検出したい場合、Mott 電子偏極検出器に対して運動量が高すぎるので、別の方法を使用しなければならない。その場合、レーザーの光子を直接電子ビームと衝突させ、コンプトン散乱を検出するシステムもある[35]

9 まとめ

本講義で偏極電子ビームの生成の基本を紹介した。現代で最も使われている GaAs 半導体の偏極電子の生成における素過程、またそれを改善するための研究と技術や GaAs 製の陰極の作り方を記した。そして、照射するレーザーの概念、スピンの操作の仕方、DC 電子銃と偏極度の検出の概念も紹介した。

このテキストを纏めるため、過去の素晴らしい偏極電子のレビューを随分参考とさせていただいた。特に参考文献[25]、過去の OHO セミナーの[36]に感謝する。

参考文献

- [1] K. Abe et al., Phys. Rev. Lett. **75**, 25-28 (1995)
- [2] K. Abe et al., Phys. Rev. Lett. **75**, 346-350 (1995)
- [3] J. Erler and A. Freitas, Phys. Rev. D **98**, 030001 (2018)
- [4] H. Davoudiasl et al., Phys. Rev. D **92**, 055005 (2015)
- [5] E. Bauer, Rep. Prog. Phys. **57**, 895 (1994).
- [6] M. Suzuki et al., Appl. Phys. Express **3**, 026601 (2010)
- [7] A. A. Sokolov and I. M. Ternov, Sov. Phys. Dokl. **8**, 1203 (1964)
- [8] M. J. Alguard et al., Nucl. Instr. Meth. **163**, 29-59 (1979)
- [9] D. T. Pierce et al., Appl. Phys. Lett. **26**, 670-672 (1975)
- [10] C. Y. Prescott et al., Phys. Lett. B **77**, 347-352 (1978)
- [11] P. Y. Yu and M. Cardona, Fundamentals of Semiconductors. Springer, 2005
- [12] J. S. Blakemore, J. App. Phys. **53**, R123-R181 (1982)
- [13] T. Nakanishi et al., Phys. Lett. A **158**(6-7), 345-349 (1991)
- [14] T. Maruyama et al., Phys. Rev. B **46**, 4261-4264 (1992)
- [15] X. Jin et al., Appl. Phys. Lett. **105**, 203509 (2014)
- [16] T. Nakanishi et al., AIP Conf. Proc. **421**, 300-310 (1998)
- [17] T. Nakanishi et al., Nucl. Instr. Meth. A, **455**, 109-112 (2000)
- [18] W. Liu et al., Appl. Phys. Lett. **109** 252104 (2016)
- [19] J. K. Bae et al., Appl. Phys. Lett. **112**(15), 154101 (2018)
- [20] J. K. Bae et al., J. Appl. Phys., **127**(12), 124901 (2020)
- [21] K. Miyoshi, Master's Thesis, Hiroshima University (2013)
- [22] G. Lei, Master's Thesis, Hiroshima University (2014)
- [23] J. Grames et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **14**, 043501
- [24] N. Chanlek et al., 2014 J. Phys. D: Appl. Phys. **47** 055110
- [25] J. Grames and M. Poelker, Polarized Electron Sources. In: Méot, F., Huang, H., Ptitsyn, V., Lin, F. (eds) Polarized Beam Dynamics and Instrumentation in Particle Accelerators. Particle Acceleration and Detection. Springer (2023)
- [26] Q. Chen et al., Nucl. Instr. Meth. A, **755**, 78-84 (2014)
- [27] M. Poelker, Appl. Phys. Lett. **67**, 2762 (1995)
- [28] C. Hovater and M. Poelker, *Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference (Cat. No.97CH36167)* **3**, 2861-2863 (1997)
- [29] J. Hansknecht, M. Poelker, Phys. Rev. ST-Accel. Beams **9** 063501 (2006)
- [30] C. K. Sinclair et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **10**, 023501 (2007)
- [31] J.M. Grames et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **7**, 042802 (2004)
- [32] R. Alley et al., Nucl. Instr. Meth. A **365**, 1-7 (1995)
- [33] K. Tamura and M. Kotera, 第37回真空に関する連合講演会プロシーディングス (1997)
- [34] A. Narayan et al., Phys. Rev. X **6**, 011013 (2016)
- [35] T. J. Gay and F. B. Dunning, Rev. Sci. Instr. **63**, 1635-1651 (1992)
- [36] M. Kuriki, OHO 2021