



2025年5月23日

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

加速器によるグリーンな半導体露光技術の研究開発を促進

～KEK 提案が「経済安全保障重要技術育成プログラム」に採択～

本発表のポイント

● Background

政府は、我が国が国際社会において中長期的に確固たる地位を確保し続ける上で不可欠な要素となる先端的な重要技術について、研究開発及びその成果の活用を推進するために「経済安全保障重要技術育成プログラム（通称"K Program"）」を推進しています。

● Proposal

さまざまな機器に使われている大規模集積回路（LSI）は微細な回路を描く露光工程で作られますが、現在最先端の露光技術は電力効率が低く、将来のさらなる微細化に向けては大幅な設計変更が必要になるなど課題が多くあります。これに代わる次世代技術として、エネルギー回収型線形加速器（ERL）と自由電子レーザー（FEL）を用いた技術が注目されています。この基礎技術の実証を進めている KEK から提案を行い、「K Program」に採択されました。実用化できれば大幅に消費電力が下がるほか、日本が半導体露光技術で世界的優位性を確保できる可能性があります。

● Schedule

本研究開発は 2025 年 4 月に始まり、2030 年 3 月末まで茨城県つくば市の KEK つくばキャンパスで実施されます。



EUV-FEL 光源施設
(主/副光源)

大規模LSI工場

EUV-FEL 光源の LSI 工場実装イメージ



KEK が提案した加速器を使った半導体露光技術の研究開発が「経済安全保障重要技術育成プログラム」に採択されました。最先端の露光機が使う極端紫外線（EUV）を加速器と自由電子レーザー（FEL）で発生させるもので、消費電力も大幅に下がることなどが特徴です。

概要

高エネルギー加速器研究機構（KEK）は、加速器による半導体露光技術の研究開発を促進します。我が国が国際社会において中長期的に確固たる地位を確保し続ける上で不可欠な要素となる先端的な重要技術について、研究開発及びその成果の活用を推進するため、内閣府主導のもと創設された「経済安全保障重要技術育成プログラム（通称"K Program"）」で、科学技術振興機構（JST）が公募した「次世代半導体微細加工プロセス技術」の実施先の一部として採択されました。実施期間は 2025 年 4 月から 2030 年 3 月までの予定です。

研究開発の背景

パソコンやスマートフォンなどさまざまな機器に使われ、イノベーションの基盤となる大規模集積回路（LSI）は、材料のシリコンウェハー表面に感光材を塗り、型紙に当たるフォトマスク経由で光を当ててパターン通りの回路を描くことで製造されます。その工程を露光といい、光の波長が短いほど微細な回路を描くことができます。

回路が微細になると、面積あたりに作り込めるトランジスタの数が増えて計算性能が上がるのに加え、消費電力も下がります。

こうした高集積化は、トランジスタを小さくしたり、配線の幅を細くしたりして進められてきました。1970 年代以降、米半導体大手インテルの共同創業者ゴードン・ムーア氏が提唱した「チップあたりの素子数は 1.5 年ごとに 2 倍になる」とする「ムーアの法則」の通り、半導体は進化してきました。

しかしその法則にも陰りが見えてきました。微細加工技術の限界が近づいてきたのです。露光に使う光の波長を短くするのが難しくなっているのが大きな理由です。

現在、最先端の半導体は「3 ナノ」と呼ばれます。このレベルの微細加工をするには私たちが感じることができる可視光（380～780 nm）より波長が短い極端紫外線（EUV）と呼ばれる波長領域の光を使う必要があります。

現在、半導体産業で用いられている EUV は、レーザー生成プラズマ法（LPP）と呼ばれる方法で発生させます。可視光より波長の長い赤外線レーザーをスズの液滴に照射してプラズマ状態にし、そこから出てくる 13.5 nm の EUV を集めて露光に使う仕組みです。

しかし課題があります。赤外線から EUV へのエネルギー変換効率が非常に低いのです。量産効率を考えると EUV のパワーは 1kW 程度が望ましいのですが、400W 程度の EUV パワーを出

すのがやっとです。

また将来、さらに短い波長の光が必要になりますが、LPP では大幅な設計変更が必要になります。スズの液滴に由来するごみが装置の内部に発生する問題もあります。

このように課題は多いのですが、現在はこの技術しかないため、世界の最先端の半導体工場の多くがこの技術を採用しているのが現状です。製造装置は非常に高価です。

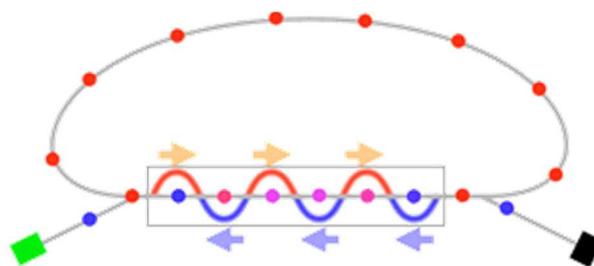
このような課題を解決する方法として、加速器を使う EUV 発生への期待が高まっています。この手法はエネルギー回収型線形加速器 (ERL) ※¹ という次世代加速器を使い、自由電子レーザー (FEL) ※² と呼ばれる技術を組み合わせます。エネルギー効率を大幅に改善でき、「beyond EUV」(波長 6.7nm を目標)と呼ばれる短波長化も比較的容易という利点があります。



KEK で運転されているエネルギー回収型線形加速器 cERL

※1. エネルギー回収型線形加速器 (ERL)

エネルギー回収型線形加速器 (ERL) は、実験に使用した電子ビームからエネルギーを回収することができる加速器です。電子銃で生成した電子ビームは加速空洞で加速され、種々の実験に利用されたのち、加速空洞に戻ります。加速空洞にエネルギーが回収されて減速した電子ビームは、ビームダンプに送られ廃棄されます。回収したエネルギーは次の新しい電子ビームを加速するために使用され、常に高品質で高い平均電流の電子ビームが実験に供給されます。エネルギーを再利用するため、地球環境にも優しい次世代加速器です。現在、KEK では小型の ERL (cERL) を運転中です。



線形加速器でのエネルギー回収のイメージ

※2. 自由電子レーザー（FEL）

光速に近い高エネルギーの電子ビームを蛇行運動させると指向性の強い光である放射光が発生します。さらに電子ビームと発生した光との相互作用で、放射光の波がそろった状態（コヒーレント状態）で増幅しレーザー発振させるものを自由電子レーザー（FEL）といいます。従来のレーザー装置は、発振波長がレーザー発振させる媒体（炭酸ガスなど）で決まりますが、FEL では自由に決めることができ、大きな出力も得られることが特長です。FEL は欧州や米国で大型の装置が稼働中です。日本では兵庫県の SACLA でも稼働しています。KEK の cERL でも小規模ながら FEL 発振に成功しています。

現在は新技術への転換点

FEL を半導体露光機として利用する発想自体は実は古くからありますが、エネルギー効率や周辺技術が十分ではなく実現が困難でした。しかし、近年の超伝導加速空洞と ERL 型加速器技術の進歩で、2005 年ごろから、ERL をベースにした FEL 光源が見直されてきました。KEK でもこの加速器が技術的に実現可能なのか、実現するとすればその実現可能な時期等について検討を行ってきました。

国外でも、ERL 型 FEL による半導体露光 EUV 光源製造のスタートアップ企業が立ち上がり、早期にプロトタイプ機を建設し、その後実用機を量産し事業化する計画を掲げています。現在はまさに新技術への転換点と言えます。

現時点では、超伝導加速空洞の ERL 型加速器を実用化している施設は世界的にもなく、試験加速器として運転されているものが数カ所にあるだけです。とくに ERL 型加速器を本格的に運転する実績があるのは日本（KEK）だけで、他国に対して数年の優位性を確保しています。

今回の K Program では、「次世代半導体微細加工プロセス技術」が公募の対象となりました。6 件の課題が採択され、うち 1 件が KEK からの本提案「革新的な次世代 EUV 露光用光源の実現を目指した自由電子レーザーの基盤技術開発」です。研究代表者は KEK 加速器研究施設 応用超伝導加速器イノベーションセンター（iCASA）の本田洋介 准教授です。

今回の研究課題で世界に先駆けて次世代 EUV 露光機のプロトタイプ機を製造できれば、応用である EUV 露光機に関連する知的財産を日本が率先して確保できます。世界市場での優位性を発揮し、露光機に対する競争力を確保できれば経済安全保障にも貢献できます。

KEK では今回の技術課題で要素技術開発を行い、実機およびプロトタイプ機に向けた全体設計を行います。本提案で主要な要素開発が完了し、ERL 型 EUV-FEL プロトタイプ機の製造に着手できるようにすることが目標です。

研究開発の概要

① 高効率ビーム加速技術

現在、cERL で加速できている電子のエネルギーは数十 MeV（光速の 99.88%程度）です。そ

れを使った FEL 発振で発生する光は赤外線であり、波長は可視光より長いのです。発生する光の波長は電子のエネルギーで決まり、エネルギーが高いほど短い波長の光を出せます。半導体露光に必要な光は波長が短い極端紫外線（EUV）であり、発生されるには 800MeV（光速の 99.99998%）程度まで加速する必要があります。そのためのエネルギー損失が少ない超伝導加速空洞を開発します。

超伝導加速空洞は極低温まで冷やして使用しますが、大電流に対応した低温容器（クライオモジュールと呼ばれます）の設計も行います。

② 大電流ビーム周回技術

半導体を短時間で製造し、量産効率を高めるためにはより明るい EUV 光が必要であり、そのためには電子の数が多い大電流の電子ビームが必要です。大電流の電子ビームを得るには加速器に入射する「種」となる電子を生成する電子銃の性能を高める必要があります。「光電陰極」と呼ばれる電子銃の心臓部の改良の成果は出ており、これをさらに進めます。

KEK では小型の ERL (cERL) を運転していますが、ERL 型加速器は世界的には事例が少なく、産業利用として成立するレベルの安定性で、大強度 FEL 発振をしながら、大電流ビームをエネルギー回収運転する技術は確立していません。

ビーム損失の制御と長期間の安定運転は、この種の加速器を実用化するために必須であり、KEK が持つ高精度ビーム監視技術を活用していきます。

③ FEL 発振技術

放射光施設では、電子を蛇行させて強い放射光を出す「アンジュレーター」と呼ばれる放射光源が使われており、KEK のフォトンファクトリーでも運用しています。cERL では赤外線ではありませんが、FEL 発振に成功しています。

アンジュレーターの産業応用にあたって製造コストを抑えることが必要です。量産化する技術を確立します。

また FEL 発振のためには、加速する電子ビームの形状を特別な形に加工する必要があります。そうしたビーム操作を行いながら、エネルギー回収と両立させる運転技術を確立します。

スケジュール・将来の見通し

今回の研究開発を通じて EUV-FEL による半導体露光技術の見通しをつけ、2029 年度までにプロトタイプ機の建設開始を目指します。そして 10~13 年後には実用機の事業化が期待されます。

10 台程度の半導体露光機を同時に駆動し、5MW の電力で 10kW の EUV を発生させ、既存の EUV 光源の消費電力を 10 分の 1 にし、環境負荷の大きい半導体製造の「グリーン化」に貢献

することができます。また将来の短波長化や小型化の検討も進めます。

「ムーアの法則」は限界に近づいていると言われます。また半導体産業の環境負荷の大きさも指摘されますが、今回の研究開発が技術革新につながり、持続可能な発展につながることを期待されます。

お問い合わせ先

<研究内容に関すること>

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 准教授

本田 洋介

E-mail : yosuke@post.kek.jp

<報道担当>

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 広報室

Tel : 029-879-6047

E-mail : press@kek.jp