

表面プラズモン共鳴を介した電子バンチ長の非破壊計測の検討 (1) NON-DISTRACTIVE ELECTRON BUNCH MEASUREMENT VIA THE SURFACE PLASMON RESONANCE 1

岡安雄一^{*A)},
Yuichi Okayasu^{*A)}, ^{A)}JASRI

Abstract

A new principal and method to realize non-distractive and real-time electron bunch length measurement are proposed and investigated. A surface plasmonic field, associated with a coulomb field from the electron bunch, is resonated outside the accelerator vacuum system through metamaterial media. The resonated plasmonic field is measured with the electro-optic (EO) sampling technique at a distance in order to avoid radiation damages for the detection system.

1. 概要

フェムト秒単一電子バンチについて、加速器真空系の外で測定系への放射線損傷を気にすることなく、非破壊・リアルタイムでバンチ長計測を可能とする計測手法の実現を目指す。真空ダクトに設けたメタマテリアルと電子バンチ起因のクーロン場で表面プラズモン共鳴 (Surface Plasmon Resonance: SPR) を真空ダクト外に励起させ、この SPR を電気光学サンプリング (EOS) で計測する測定系 (SPR-EOS) を開発する。目標とする電子バンチ長は 30 fs (FWHM) である。

自由電子レーザー加速器の電子バンチ長については、従来ストリークカメラや RF ディフレクター、コヒーレント放射計測によるバンチ破壊計測が行われてきた。2000 年代初頭からは、GaP や ZnTe といった無機ポッケルス EO 結晶を用い、非破壊・リアルタイム計測が実現したが、結晶固有の THz 場吸収特性により、時間分解能は 100 fs (FWHM) 程度に制限されている。2012 年には、数十 fs (FWHM) の時間分解能が見込まれる有機ポッケルス EO 結晶による EOS 計測が、我々のグループにより世界で初めて実現したが^[1]、結晶に対する放射線損傷を原因とする時間分解の低下が問題となった。

本報告では、SPR を効率的に励起するためのクレッチマン配置型プリズムの構造、またプリズムに設置するメタマテリアル構造の最適化、効率的に導波するためのメタマテリアルパターンの最適化について進捗を報告する。

2. SPR-EOS の原理

SPR-EOS の提案は、第 11 回日本加速器学会年会で報告したが^[2]、再度簡単に原理を紹介する。

Figure 1 に SPR-EOS のセットアップの横断面概念図を示す。20^W × 10^D × 20^H mm³ 程度の合成石英製プリズムを、電子バンチの進行方向に対し、クレッチマン配置で真空チェンバーに設置する。プリズムとチェンバーの接合方法は、Vacseal[®] を想定している。蝟付けは、1) 熱負荷がプリズム内に残留弾性応力を生む恐れがあり、結果としてプリズムの屈折率が変わってしまう可能性があること、2) 複数のメタマテリアルをマウントしたプリズムを交換して試験したいことを勘案し、採用しない。プリズムの大気側には 50 ~ 100 nm 程度の厚みの金属 (金、銀、アルミニウム等) 薄膜を蒸着する。電

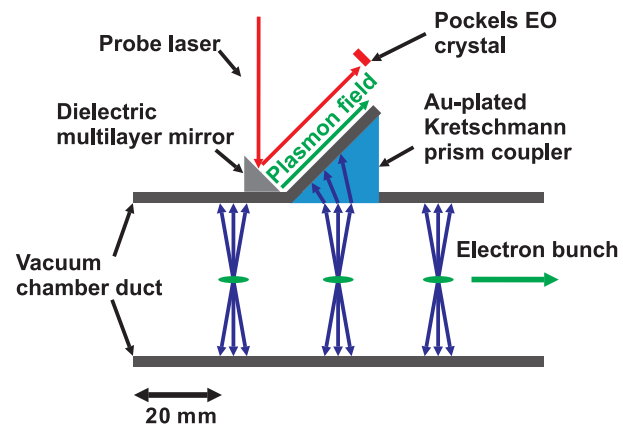


Figure 1: SPR-EOS measurement system via the surface plasmon resonance excitation at RF photocathode gun test accelerator facility, SPring-8/SACLA.

子バンチ起因のクーロン場がプリズムを透過して金属薄膜へ入射する際、固有の入射角において金属薄膜上に表面プラズモン場が共鳴・励起される。この SPR を空間線量の低い任意の場所では有機 EOS 計測し、電子バンチ長情報に復調する。大気側の金属薄膜表面に、ナノメートルオーダーの溝、ないしは円筒状のパターンを設け、SPR を EOS 計測系まで効率よく導波させるものである。金属薄膜へのパターン形成は、全国に展開するナノテクノロジープラットフォーム拠点の電子ビームリソグラフィ装置等を用いて行う。本研究で想定するプリズムのサイズは、一般的な電子ビームリソグラフィ装置でのパターン蒸着には大きすぎて適さないため、プリズムと同じ材質の合成石英板 (厚み 0.5 ~ 1 mm) 上にパターンを形成し、プリズムにオプティカルコンタクトで接合する手法を採用する。

SPR-EOS の実証実験は、SPring-8/SACLA 附設の RF フォトカソード電子銃試験加速器 (現在高度化改造中) で行う。加速器の性能諸元を Table 1 示す。SPR-EOS 測定系は、これらの加速器のパラメータに適合するように設計されなければならない。ここでは現在検討を進めている、

- 1) 金属薄膜の部材、厚み最適化
- 2) 金属薄膜に対するクーロン場の入射角 (プリズムの角度)

* okayasu@spring8.or.jp

- 3) プリズムの屈折率
- 4) 効率的な SPR の導波を実現するメタマテリアルパターンの最適化

について、主に CST STUDIO SUITE による計算結果を用いながら報告する。

Table 1: Expected Specifications of the RF Photo-cathode Electron Gun Test Accelerator Facility in SPring-8/SACLA

* 電子バンチ	
エネルギー	60 MeV (最大 85 MeV)
バンチ電荷量	~100 pC
バンチ長	30 - 50 fs (FWHM)
繰り返し周波数	10 Hz
* プロブレーザーパルス	
バンド幅	300 nm (FWHM) @ 795 nm
パルスエネルギー	>10 μ J
繰り返し周波数	10 Hz

3. SPR-EOS 開発進捗状況

3.1 金属薄膜の部材選定

SPR 励起に用いられる金属薄膜の部材として、金と銀が一般的であるが、ここではアルミニウムも加えて、金属薄膜における入射波 (電子バンチ起因のクーロン場を想定した THz 波) の反射率 (S_{11}) の計算結果を比較し、結果を Figure 2 に示す。金属薄膜の厚みはいずれも 83 nm である。合成石英は厚さ 1 μ m の S-BSL7 (OHARA) を仮定した。また CST STUDIO SUITE で入射波として仮定した電場の時間分布も Figure 2 に上書きした。

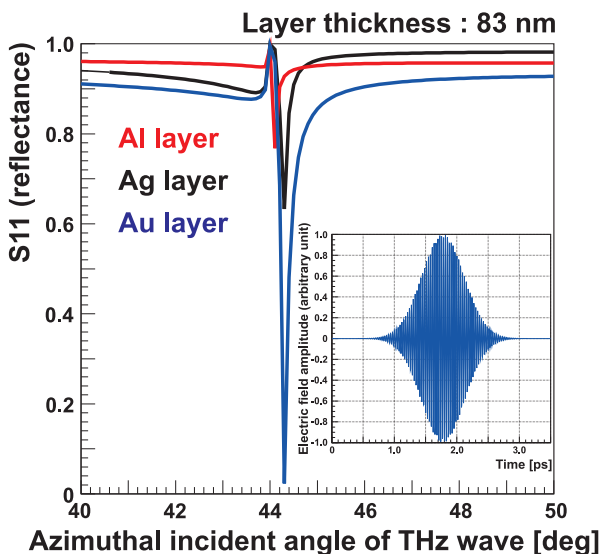


Figure 2: Calculated S_{11} parameters (reflectances) comparing three planar metals; Al, Ag and Au. An incident electric field distribution for CST STUDIO SUITE calculation is also superimposed.

金の金属薄膜において、入射波を 44.3° とした場合、入射波の反射率は 0.02 と最も低いことが判った。反射率を最小とする入射角範囲は約 0.1° 程度と極めて狭いことから、プリズム、若しくはチェンバー本体に精度の良い回転機構を設けることが必須である。

3.2 金属薄膜の厚みとクーロン場入射角の最適化

次に金属薄膜に金を採用し、厚みとクーロン場の入射角度の最適化を確認した。合成石英は厚さ 1 μ m の S-BSL7 (OHARA) を仮定した。横軸に金薄膜の厚み、縦軸にクーロン場の入射角をとった場合の、反射率のカウンタープロットを Figure 3 に示す。

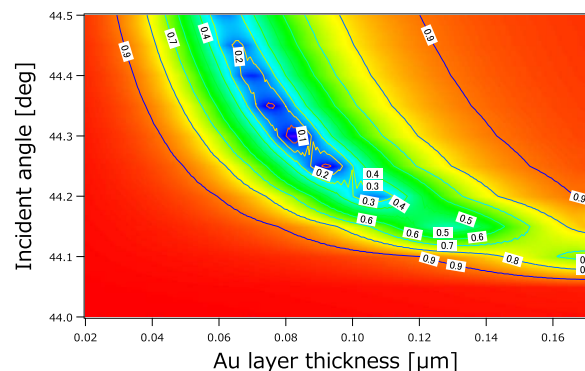


Figure 3: Calculated S_{11} parameter correlating with Au layer thickness and incident angle of the Coulomb field to the Au layer.

計算では金薄膜の厚みを 20 nm ~ 170 nm、入射角を 44.0° ~ 44.5° の範囲でそれぞれ振ったが、83 nm、44.3° で反射率の最小が得られることを確認した。また Figure 3 より、入射角度は 44.3 ± 0.2°、金薄膜の厚みは 83 ± 20.5% の許容があり、金薄膜の厚み交差に余裕があることが判る。

3.3 プリズム (合成石英) の選定

プリズムに使用される合成石英の種類は豊富に存在するが、ここでは想定されるクーロン場の中心波長 (9 μ m) に対する屈折率について、Table 2 に示すように幅広い種類の部材を採用し、83 nm 厚の金薄膜におけるクーロン場の反射率を比較した (Figure 4)。

Table 2: Refractive Indices of Various Synthetic Fused Silica Glasses

合成石英の種類	屈折率 @ $\lambda = 9 \mu\text{m}^{[3]}$
N-FK51A (SCHOTT)	1.1487
BSC7 (HOYA)	1.2289
BAF10 (HOYA)	1.3014
E-SF11 (HIKARI)	1.3690
S-BSL7 (OHARA)	1.4233
ZF13 (CDGM)	1.4323
ZF4 (CDGM)	1.4536

クーロン場の入射角度を 44.3° に固定した場合、BK7 群

(S-BSL7) が最も低い反射率を与える。部材の汎用性・入手性も良好であるため、BK7 を採用する。

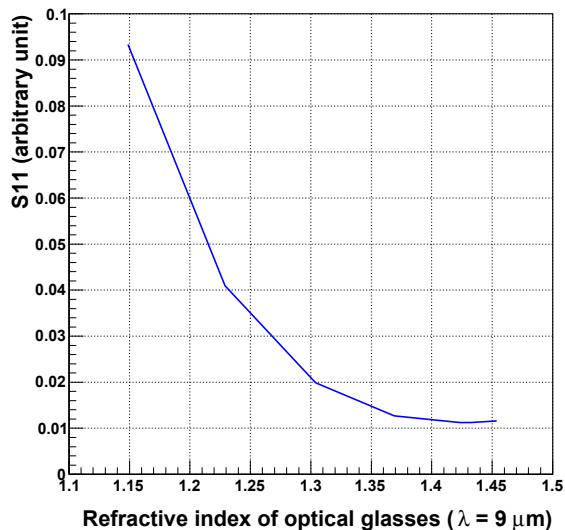


Figure 4: Calculated reflectance of Coulomb field at the metamaterial surface depending on refractive indices of various synthetic fused silica glasses.

3.4 メタマテリアルパターンの最適化 (検討中)

最後に現在検討を進めているメタマテリアルパターンの最適化について、進捗を報告する。前述した通り、金属薄膜に対するパターン形成は、全国に展開するナノテクノロジープラットフォーム拠点の設備を利用して実施する。パターン形成の方法は Figure 5^[4] に示すように大きく分けて 2 通りある。

ひとつは、金をドライエッチングで削る方法である (Figure 5, Type A)。金薄膜の表面に電子ビーム (EB) レジストを塗布し、電子ビームリソグラフィで EB レジストに描画、最後にエッチングする。長所はピラーの形状が比較的美しく仕上がる点で、短所はエッチングで残した金薄膜の厚みが正確に制御できない点である。ふたつ目は金薄膜を 2 段階で成膜する方法である (Figure 5, Type B)。EB レジストの描画までは Type A と同様であるが、描画した EB レジストに EB アークプラズマ蒸着装置で金薄膜を成膜、EB レジストを除去する。長所は Type A に比べ、金残膜の厚みを精度よく制御できるのに対し、短所はピラー形状が台形になる点である^[4]。

実際に $1 \mu\text{m}$ 四方、 83 nm 厚の金薄膜に、深さ 40 nm 、 $\phi 50 \text{ nm}$ 、 $\phi 60 \text{ nm}$ の孔を電子バンチの軌道に沿って 80 nm 間隔で設けたメタマテリアル表面における、SPR 場の E_z 成分を比較した結果を Figure 6 に示す。プリズムはいずれも S-BSL7 で厚みは $1 \mu\text{m}$ である。

いずれの場合も、 E_z の最大/最小値は $\pm 5 \text{ MV/m}$ 程度であるが、孔のサイズが大きくなるにつれ、若しくは孔の間隔が狭くなるにつれ、SPR 共鳴の E_z 成分は Figure 6 (右図) に示すように二極化してしまい、EOS 計測を行う方向に於いて相殺されてしまう。導波機能は良好である。前述の通り、膜厚自体には $\pm 20.5 \%$ 程度の許容は

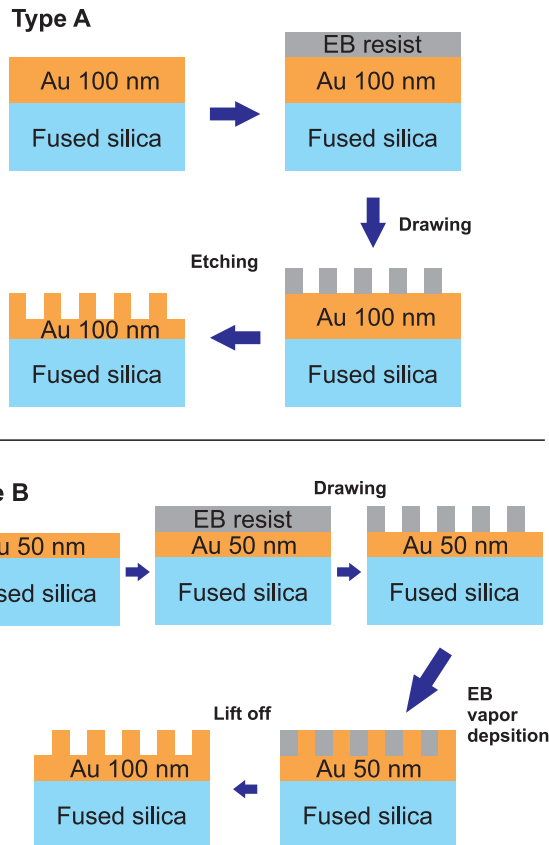


Figure 5: Patterning processes for the SPR-EOS metamaterials.

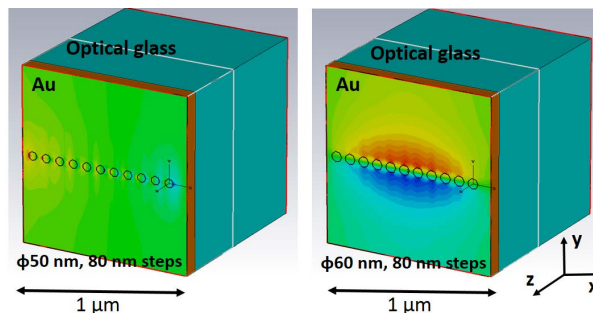


Figure 6: Calculated electric field (E_z) distributions on the metamaterial surfaces with two different pillar patterns. Different hole size; $\phi 50 \text{ nm}$ (left) and $\phi 60 \text{ nm}$ (right), 40 nm depth and 80 nm steps are common for each case.

あるが、共鳴強度が孔の深さに依存することが明確な場合は、上述の Type B による成膜方法は避けざるを得ない。

4. まとめ

数十フェムト秒オーダーの単一電子バンチについて、非破壊・リアルタイムで、且つ放射線損傷を気にすることなくバンチ長計測を可能とする SPR-EOS 計測系を提案し、開発を行っている。測定系の実証試験は SPring-8/SACLA 附設の RF フォトカソード電子銃試験加速器

PASJ2015 THP086

(現在高度化改造中)で行う。測定対象とする電子バンチ長は 30 fs (FWHM) である。測定系の要となる開発要素は、メタマテリアルをマウントした、クレッチマン配置型プリズムの開発である。現在、メタマテリアルの材質、膜厚、クーロン場の入射角度(プリズムの角度)、プリズムの部材選定までは一旦完了し、入射角度と膜厚の許容はそれぞれ順に $44.3^\circ \pm 0.2\%$ 、 $83 \text{ nm} \pm 20.5\%$ であることが判った。現在は SPR を効率よく導波させるためのパターンの最適化を行っている。パターンは SPR の導波に強い指向性をもたせる必要があることから、薄膜をドライエッチングする方法が現在のところ優位である。SPR の E_z 成分強度、時間減衰を評価しつつ、パターンの最適化を行う。並行して、試験チェンバーの試作を行い、2015 年下旬までには仕様を固める。

5. 謝辞

本研究は JSPS 科研費 15K13415 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Y. Okayasu *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **16**, 052801 (2013).
- [2] Y. Okayasu *et al.*, in Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-11, 2014, Aomori, Japan, p691.
- [3] <http://refractiveindex.info>
- [4] K. Chikada. Private communication.