

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560402

研究課題名(和文)表面プラズモン共鳴を用いたホトカソードによる高速バンチビーム形成

研究課題名(英文)High frequency modulated electron beam employing surface plasmon resonance

研究代表者

根尾 陽一郎 (NEO, YOICHIRO)

静岡大学・電子工学研究所・准教授

研究者番号：50312674

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：スミス・パーセル超放射は、高出力・周波数可変・コヒーレント・パルス/連続発振のテラヘルツ帯の理想的な光源である。本研究は超放射用変調ビームに関する研究である。高速の変調ではフェムト秒で応答する金属が有効であるが、高い反射率・低い量子効率が課題となる。この為、表面プラズモン共鳴ホトカソードを提案した。

クレッチマン配置では、共鳴点で放射電流が最大となったがプラズモン振動と電子放出のベクトルの不一致が量子効率の低下を引き起こした。端面を形成し振動と放出方向を一致させた結果、最大千倍の電流が増加した。しかしエミッションサイトにフラクタル形状の痕跡残った。オット配置も行ったが、同様の結果となった。

研究成果の概要(英文)：We developed the newly proposed photocathode employing surface plasmon resonance, which is for preparing the modulated electron beam at high frequency tube in Tera hertz region. The emission current as function of incident angle exhibited a local maximum in agreement with Kretschmann arrangement's the resonance incident angle. However this device had a quantum efficiency (QE) of the order of 10 to the -4th power lower than expected. The emission direction is different from the momentum of the excited plasmon in this device. To increase its QE, The direction of plasmon oscillation was agreed with emission direction at the edge. With this arrangement, emission current showed 1000 times increase. But the unique ruins like fractal pattern remained on the film. We also tried Otto arrangement. But the results were same as Kretschmann arrangement.

研究分野：真空ナノエレクトロニクス

キーワード：スミス・パーセル超放射 ホトカソード 表面プラズモン共鳴 クレッチマン配置 オット配置

1. 研究開始当初の背景

赤外線からマイクロ波帯の間にあるテラヘルツ帯域の開発が急務となっている。これはテラヘルツ帯の応用としてバイオテクノロジー分野(たんぱく質, DNA 解析), 医療分野(生体組織の機能診断, 無侵襲医療診断, 薬物診断), 通信分野(超高速通信デバイス, 超高速光通信情報処理)などへの様々な可能性が明らかになってきた為である。この様な背景の中, 小型で高出力, 周波数可変な光源(発振器・増幅器)の開発が急務となっている。現在主流なのは, 低温成長ガリウム・ヒ素化合物半導体へのフェムト秒レーザー照射や非線形光学結晶を用いた光パラメトリック発振等である。また一方で高出力が期待される真空電子デバイスのテラヘルツ帯の開発の歴史は長く, 1960 年代に提案された Ledatron (Orotron) や後進波管(Backward Wave Oscillator: BWO) が既に商業ベースとなっている。しかし BWO に代表される従来の超高周波真空電子デバイスは高周波数化に伴う, 遅波回路の縮小化, 機械加工の限界による周波数の上限が問題となる。また高電流密度なビーム形成には強力な磁場が必要な事, それによるカソードの寿命に制限があり普及はしていないのが実情である。

2. 研究の目的

この様な状況の中で超放射スミス・パーセル(Superradiant Smith-Purcell: SR-SP)が注目されている。SR-SP の最大の優位性は, 高出力なパルス・連続発振が可能で, 広い周波数帯域で波長可変な誘導放射が可能な事が挙げられる。まず自然放射である SP 放射光の動作原理を図 1 に示す。

荷電粒子が金属周期構造上を運動する際, 映像電荷とで作るダイポールが電子の運動と共に周期振動を伴い, 電磁波を放射する。このダイポール振動によって放射される SP 放射光は遮断周波数が存在せず, あらゆる波長で放射可能である特徴をもつ。

SR-SP の原理を示す。電子 N 個の連続ビーム及びパルスビームとそれが k 個で構成される同期バンチビームの出力は, 電子 1 個からの出力を I とした場合, その出力は図 2 に示す関係となり高出力化が実現可能となる。回路周期と同期したバンチビーム形成により出力は非線形に増加し超放射を引き起こす。高速バンチビームが高周波電子デバイスに応用可能で, その発振閾値電流密度を大幅に低減可能であり, また装置の小型化等にも効果がある。

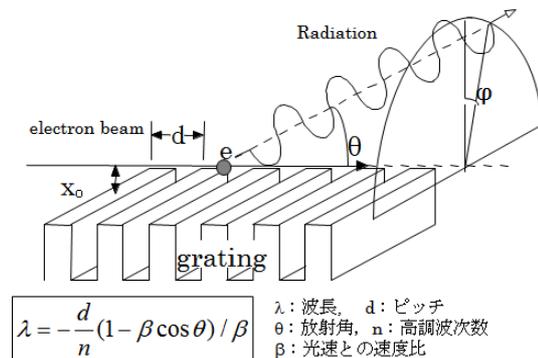


図 1. スミス・パーセル超放射光

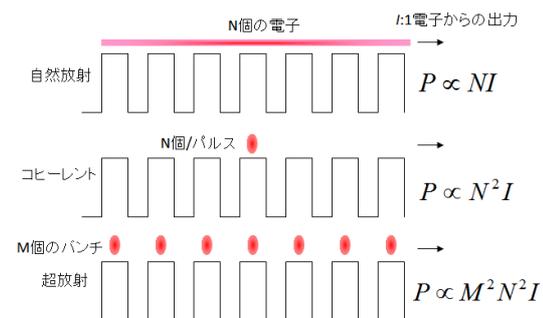


図 2. 超放射の概念図

テラヘルツ帯の SR-SP 実現の為には, ピコ秒で高密度なバンチビーム形成が必要不可欠である。この様な超高速変調はホトカソードの光変調が有効であると考えられる。しかし, 一般的な負電子親和力表面を形成した化合物半導体ホトカソードでは応答速度がキャリア寿命により決定される為にナノ秒以下の変調は困難である。そこでキャリア緩和時間がフェムト秒の金属を用いた光励起カソードが候補となった。しかし高い反射係数を持つ点, 金属内部での電子-電子散乱に

よるエネルギー損失により結果的に低い量子効率となる問題がある。この問題を解決する為、金属の 10^{-12} 秒以下の速いキャリア緩和時間を利用し、且つ量子効率を著しく向上できる『表面プラズモン共鳴[SPR]を用いた光励起カソード』の開発を行う事を研究目的とする。

3. 研究の方法

第一段階として表面プラズモン共鳴にはクレッチマン配置を採用した。光励起電子を得る為に、光子エネルギーは金属の仕事関数よりも高い必要がある為、波長 266nm (4.66eV) の CW レーザーを採用した。この波長で SPR を起こす材料としてアルミニウムを選択し、必要な膜厚は光学計算により決定した。真空蒸着により所望の膜厚のアルミニウムを堆積した石英プリズムを、高真空層内の回転ステージに搭載した。回転ステージには反射率測定用のフォトダイオードとアルミニウム薄膜に対向して配置したアノードが一体化されている。プリズムへ P 偏光入射を行い、その時の反射率・放出電流の角度依存性を評価した(図3)。また本装置により、強電界印加によるショットキー効果、セシウム堆積による仕事関数低下の効果を評価可能である。また量子効率の更なる向上の為に、クレッチマン配置のアルミニウム薄膜に端面を形成したホットカソードについても研究を行った。それらの詳細は次節で説明する。

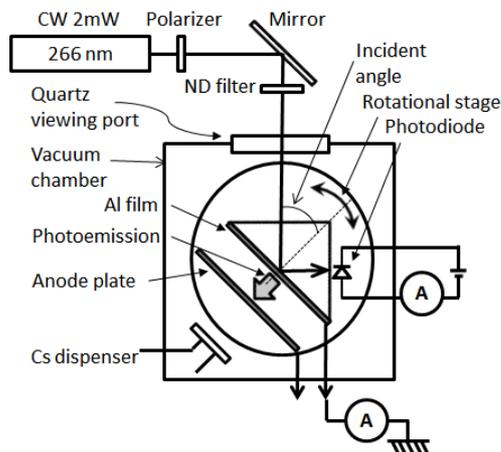


図 3. 実験装置

4. 研究成果

図 4 にクレッチマン配置の SPR ホットカソードの反射率・放射電流の入射光角度依存性を示す。共鳴角度でホットダイオード電流が極小になっており、放射電流がその近辺で最大になっている事がわかる。放射電流の最大値と共鳴角度には若干のズレが生じており、最大放射電流角度は電場増強効果の最大と一致している事が既に分かっている。また入射パワーを増加した場合には、その放射電流量は線型に増加する事が確認された。図 5 に放射電流最大値時の量子効率を評価した結果を示す。当初のモデルとは大きく異なり、その量子効率は $10^{-5} \sim 10^{-4}$ に分布しており、従来の紫外線励起の金属ホットカソードと比較しても低いものとなった。この原因として表面プラズモンの励起方向と放射方向との不一致が考えられる。

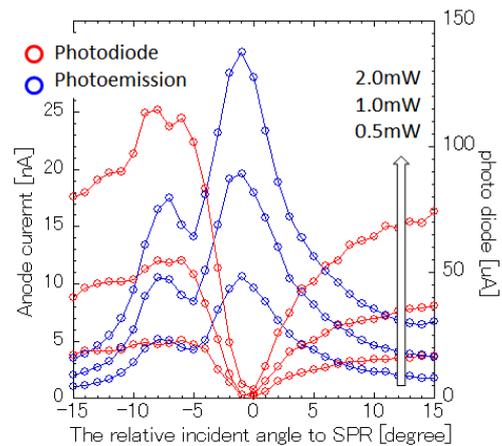


図 4. 放射電流・反射率の角度依存性

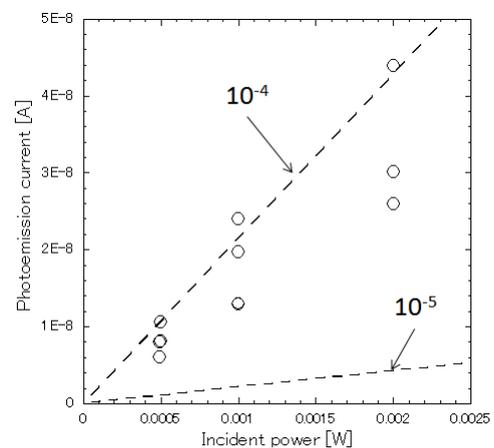


図 5. クレッチマン配置の量子効率

量子効率を向上する為に二つの手段について検討した。一つ目は、従来から広く用いられている仕事関数を減少させた効果について評価を行った。エネルギー損失を伴う電子-電子散乱過程が不可避であることから、仕事関数を減少する事で真空障壁により放射出来なかった電子をより多く真空中へ放出させる事が可能だと考えられる。仕事関数を減少させる方法としてショットキー効果及びCs堆積の二つの方法を評価した。図3に示す実験装置で、カソード・アノード間距離は1mmであり、アノードには最大10kV印加可能である。また10mmの開孔を形成した電極に交換可能であり、この開孔を通してCsディスペンサーにアノード表面を露出する事が出来る。これによりカソード表面にCs堆積を行う。以上の2方法により得られた光放射電流の変化を図6及び7に示す。図6では仕事関数の低下に伴い緩やかに量子効率が向上している事がわかる、しかし量子効率改は約2倍程度である事が明らかとなった。一方、Cs被覆による仕事関数の減少の効果を図7に示す。この結果からも量子効率が最大 10^{-4} 台で飽和し、改善が2倍程度である事がわかる。以上より、仕事関数の低下による量子効率の向上は、若干であり有効な手段ではない事が明らかとなった。

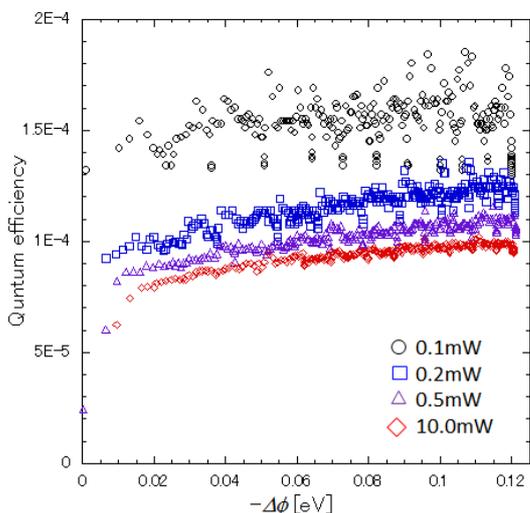


図6. ショットキー効果による仕事関数低下

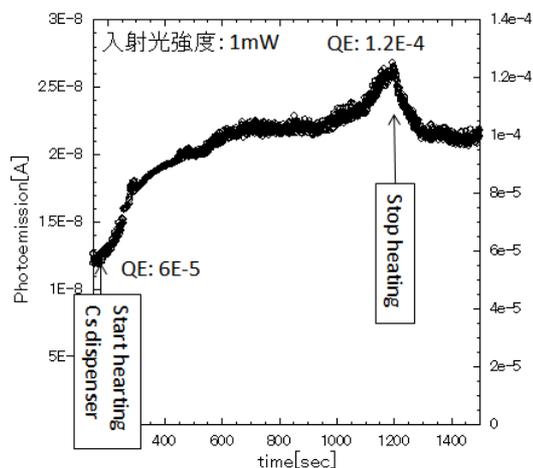


図7. Cs被覆による仕事関数低下

これまでの研究結果より励起される界面方向に放射面を形成する事で運動量を保存して電子を真空中へ放出させる事が量子効率の向上に効果があると考えに至った。図8に今回新たに用いた概念と実験系を示す。プラズモンの励起後に電子-電子散乱を経ずに真空中へ放出させる為には、薄膜に断面を形成し、放出サイトと励起方向を一致させる事にした。実験系は、断面を形成した21nmのアルミニウム薄膜をプリズム上に準備し、レーザーを共鳴角度で入射する。その入射位置を断面方向に走査する事で、励起位置と断面を一致させ、励起されたプラズモンが断面に露出する条件が実現出来ると考えられる。レーザー走査位置毎に放射電流・反射率の変化を評価した。また今回用いたレーザー径は約1mmである。

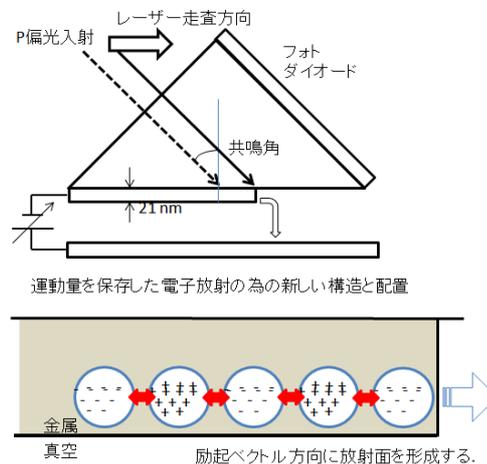


図8. 運動量を保存した電子放射の概念

入射強度とアノード電圧をパラメーターとして評価した．図9にこの実験で得られた典型的な結果を示す．横軸は共鳴角を維持した状態でのレーザーの走査距離，縦軸は放射電流とフォトダイオードの出力である．用いた条件はアノード電圧: 1kV, 入射パワー: 1mW である．断面にレーザー径が重なるに従い，共鳴条件から外れ，石英/真空/アノードによる反射が含まれ，幅約 1mm にわたって反射率が上昇していくのが分かる．これに伴い放射電流が著しく上昇する事が観察された．断面以外では放射電流: 42nA, 量子効率: 1.9×10^{-4} 程度だったものが，断面に重なった状態では最大放射電流: 34.4 μ A, 最大量子効率: 0.16 と著しい改善がみられた．また一連の実験で同様の現象が観察される条件には，二つの要因が必要である事が分かった．入射パワー: 500mW 以上，且つアノード電圧: 500V 以上の時に著しい放射電流の上昇が得られている．

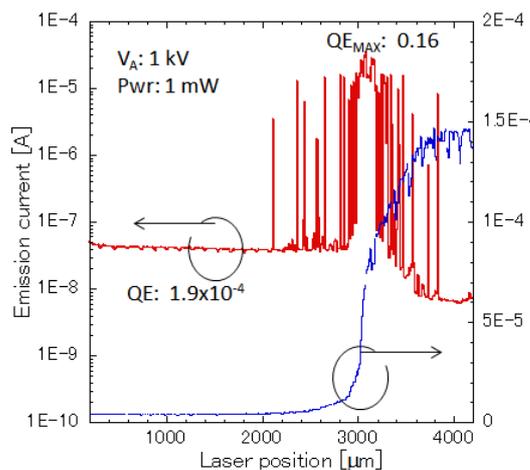


図 9. 新しい配置の電子放出特性

しかしながら，この著しい放出電流の上昇に伴い，放出サイトに特徴的な痕跡が残る事が分かった．測定後のカソード端の状態を図10に示す．断面近辺でアルミニウム薄膜が広範囲に剥離しており，更に剥離した領域が特徴的な形をしている事が確認出来る．特徴的なのは痕跡がフラクタル図形をとる事である．

この現象が発生する要因として放電が考えられるが，仕事関数以下の波長 405 nm(3.06eV)を用い，入射パワー: 5 mW, アノード電圧: 1000V の条件で同様の実験を行った結果．図9の条件よりも5倍高い入射パワーに関わらず，同様の現象は確認されなかった．この結果から放電ではなく，ホトエミッションが関係している事は明らかとなったが，詳細は調査中である．

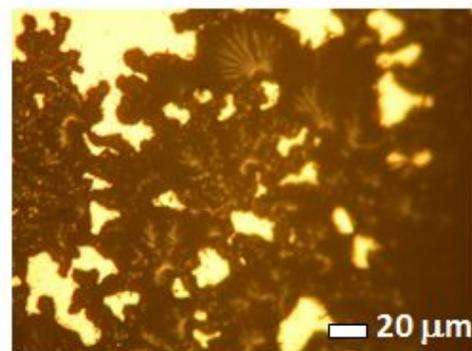
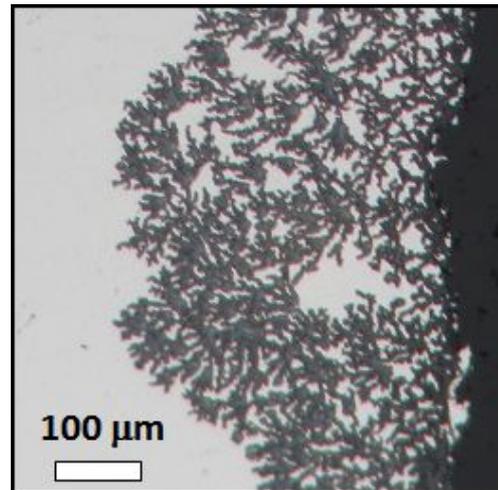


図 10. 電子放出後の放出サイトの光学顕微鏡写真

また同様の実験をクレッチマン配置のみならずオット配置を用いても行っている．結果が図9,10と同様に，運動量を保存した条件で，放出電流の増加とフラクタルの痕跡が確認されている．

5. 主な発表論文等
(研究代表者，研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

M. Noyori, Y. Neo, and H. Mimura,
Single-crystalline poly(vinylidene
fluoride-trifluoroethylene) nanofiber webs
fabricated by electrospinning, J. J. Appl.
Phys. 54 (2015) 021601-1-4, 査読有

H. Shimawaki, Y. Neo, H. Mimura, F.
Wakaya, and M. Takai, “Photoassisted
electron emission from
metal-oxide-semiconductor cathodes based
on nanocrystalline silicon, JOURNAL OF
APPLIED PHYSICS 113, 153705 (2013),
査読有

Koike, Y. Neo, H. Mimura, H. Murata, T.
Yoshida, T. Nishi and M. Nagao, “Field
Emitter Equipped with a Suppressor to
Control Emission Angle”, IEEE electron
device let. 34(2013), pp. 704 – 706, 査読
有

〔学会発表〕(計 29 件)

H. Mimura, Y. Neo, T. Aoki, and T.
Matsumoto, “Novel Photocathode Using
Surface Plasmon Resonance”, 3rd Inter.
Conf. on Nanoscience and nanotechnology,
Chennai, India, 4-6 February, 2015

Yilmazoglu, S. Al-Daffaie, F. Küppers, H.
L. Hartnagel, Y. Neo, H. Mimura,
“Photocathodes based on graphene
nanoplatelet emitters on semi-insulating
GaAs photoswitch”, 27th International
Vacuum Nanoelectronics Conference,
July 6-10, 2014, p.21-22. Engelberg,
Switzerland.

H. Mimura, Y. Neo, and T. Matsumoto,
“Novel Photocathode Using Surface
Plasmon Resonance”, 27th International
Vacuum Nanoelectronics Conference,

July 6-10, 2014, p.27-28. Engelberg,
Switzerland.

H. Mimura, Y. Neo, and T. Aoki, “Novel
Photocathode Using Surface Plasmon
Resonance”, 3rd International Conference
Materials, Energy and Environments,
Honolulu, Hawaii USA, 1-3th July 2014

H. Mimura, C. H. Chen, Y. Neo, and T.
Matsumoto, “Photocathodes Using Surface
Plasmon Resonance” 2013 SPIE
Microtechnologies Nanotechnologies IV,
Grenoble, France, May 24-26, 2013, 24th,

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

根尾 陽一郎 (NEO, YOICHIRO)
静岡大学 電子工学研究所
研究者番号：50312674