

氏名	Bae 裴 鐘石 Jongsuck
授与学位	工学博士
学位授与年月日	平成2年3月14日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最終学歴	昭和51年3月 朝鮮大学校工学部電子科卒業
学位論文題目	サブミリ波帯における逆スミス・パーセル効果に 関する研究
論文審査委員	東北大学教授 水野 皓司 東北大学教授 稲場 文男 東北大学教授 小野 昭一

論 文 内 容 要 旨

逆スミス・パーセル (ISP) 効果は、レーザー光と荷電粒子 (電子) との相互作用を金属回折格子を用いて実現する新しい方法として、1975年に水野、小野、下江によって提案された。図1に、ISP効果の原理図を示す。金属回折格子表面すれすれに、格子溝に直交させて速度 v の電子ビームを通し、入射角 θ 、波長 λ のレーザー光を図の様に電子ビームに照射した時、図中の各パラメーターが次式を満足すると電子はレーザー光によって回折格子上で連続的に加速或は減速される。これが、ISP効果である。

$$n\lambda = D(c/v - \cos\theta)$$

ここで、 n は正の整数、 D は格子ピッチ、 c は光速である。

ISP効果は、1 TeV の到達エネルギーを持つ次期世代のレーザー駆動電子加速器、光増幅器 (光クライストロン)、物質の緩和過程を調べるため用いられるサブピコ秒の超短電子パルスの生成等、従

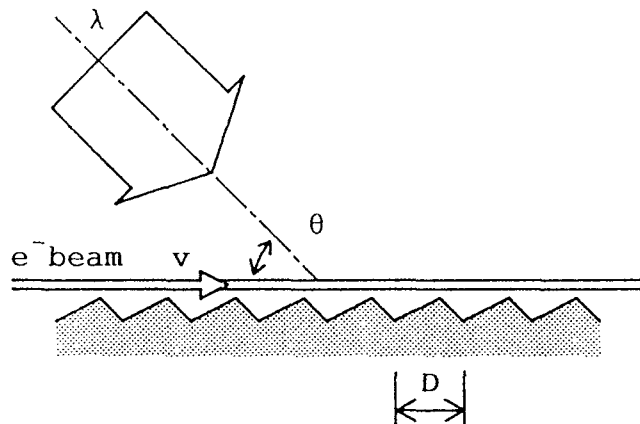


図1 原理図

来の方法では得られなかった新しい電子デバイス実現の可能性を持っている。しかし現在まで、この効果に関する研究は、実験的な確認さえも未だ行われておらず、原理的な検討の段階を脱していない。

本研究は、逆スミス・パーセル効果を実験的に検証し、理論との照合を行なうことによって、レーザー光と電子との相互作用のメカニズムを明らかにし、新しい電子デバイス開発の基礎データを得ることを目的として行われた。本研究で、ISP効果の検証実験は、サブミリ波レーザーを駆動源として行なっている。その理由は、電子とレーザー光との回折格子上的相互作用領域が赤外、可視域に比してより広くとれるためである。これはISP効果の実験が全く行なわれていない現在の研究段階では、赤外や可視域の短波長高出力レーザーを用い大きな電子エネルギー変化を得ることにより、広い相互作用空間を利用して精度の高い詳細な測定を行い、理論との照合を通してこの効果の特性を明らかにすることがより重要であると考えたためである。その結果、波長 $496\mu\text{m}$ のメチルフロライド(CH_3F)レーザーを用いてISP効果の観測に世界で初めて成功した。本論文は、サブミリ波帯におけるISP効果の理論解析及び実験結果をまとめたものである。本論文は、全文5章より構成されている。以下に、各章毎に内容の概要を述べる。

第1章 緒 論

ISP効果の発想の経緯、現在までの研究状況、そして本研究の意義について述べている。

第2章 逆スミス・パーセル効果の理論解析

ISP効果の研究は、従来回折格子の形状まで含んだ詳細な理論解析が行われていなかった。そこで、サブミリ波帯でこの効果を実験的に検証することを第一の目的として、製作及び理論解析が容易な櫛の歯形の溝断面を持つ金属回折格子を選び、格子上の電磁界分布を計算した。更に、解析した電磁界分布を用いてサブミリ波レーザー光が照射された時の電子ビームの軌道解析を詳細に行なった。これらの解析効果よりISP効果を検証するために要求される実験装置の各性能を明らかにした。以下に、理論解析により得られた成果を箇条書に述べる。

- 1) 電子とレーザー光との相互作用量が最大となる回折格子溝定数の設計法を確立した。
- 2) 回折格子面の法線方向よりレーザー光を入射させるISP効果の垂直入射モデルにおいて、この効果が生じ得る電子速度 v の限界($v/c \sim 0.9998$ at $d/D = 0.16$)を明らかにした。
- 3) 電子とレーザー光との相互作用領域は、電子速度 v の増加とともに広がり、 v の増加に伴う相互作用量の減少を考慮しても、高い初期速度を持つ電子ビームを使うことが数多くの電子を加速することが出来、有利であることを明らかにした。
- 4) ISP効果を 100keV までの初期加速エネルギー($v/c \sim 0.5$)の範囲で実験的に検証するためには、電子エネルギー分析器の分解能として 1eV 以下であれば、サブミリ波レーザー(波長= $496\mu\text{m}$, CH_3F)の出力として単一基本横モードで 1W 以上あれば良いことを明らかにした。

第3章 EMQスイッチCO₂レーザー励起サブミリ波レーザー

ISP効果の最初の検証実験で用いる駆動用レーザーとして、比較的長波長(496 μ m)で発振利得が高い光励起CH₃Fレーザーを選んだ。このレーザーに要求される性能は、測定のス/N比を高めるため、高繰り返しレート(>1kpps)で、高出力単一ピークパルス(>1W)、単一基本横モードを持つ事である。しかし、従来のサブミリ波レーザーにはこの出力特性を満足するものが無かった。そこで新しくCH₃Fレーザーの励起光源としてメカニカルチョッパーによるQスイッチとそれに同期したパルス放電励起を組み合わせたEMQスイッチCO₂レーザーを開発、製作した。このレーザーは、単一ピークパルス、単一TEM₀₀モードで最大繰り返しレート9.2kpps、最大ピーク出力33kWの出力を持つ。

このCO₂レーザーで励起されたCH₃Fレーザーは、同じく単一ピークパルス、単一EH₁₁モードで、最大繰り返しレートはCO₂レーザーと同じで、最大出力パワーとして86Wを持つ。これらの値は、従来の方法では得られなかったものであり、ISP効果実験用として十分な性能を持つものである。

第4章 逆スミス・パーセル効果の実験的検証

ISP効果の理論解析の結果に基づき、各実験装置の設計製作を進めた。そして、楯の歯断面の溝構造を持つサブミリ波帯用金属回折格子を $\pm 2\mu$ mの精度で製作できた。又、中心エネルギー80keVの電子を0.8eVの分解能でエネルギー分析出来る逆電界型の電子エネルギー分析器、低雑音電子検出系等を設計製作した。

ISP効果の実験は、製作したCH₃Fレーザーを始めとする各実験装置の十分な予備実験の後行なわれた。この結果、ISP効果の理論提案以来初めてこの効果の観測に成功した。図2は、ISP効果による電子エネルギー変化を調べた分析結果の一例である。横軸が電子エネルギー(中心:80keV)、縦軸が電子電流の変化量である。

この実験を通して得られた成果は、次の通りである。

- 1) ISP効果に於ける電子速度、レーザー波長、そして回折格子ピッチ間に成り立つ同期条件式を実験的に検証した。
- 2) レーザーパワーに対する電子エネルギー広がり理論値と4のファクターで一致することを確認した。
- 3) 回折格子表面より離れるに従って振幅が減少する evanescent 波の性質を実験的に調べ、その傾向を確認した事である。

第5章 結 論

ISP効果の実験結果を通して、理論解析の結果と実験結果が比較的良好に合う事から、本研究で行なったこの効果の理論が妥当なものであることが示された。そして、本研究の第一の目的であったISP効果の実験的検証を達成出来た。本研究で得られた成果は、次期世代の荷電粒子加速器と目されるレーザー加速器の開発及び微小ギャップを用いた光クライストロン等の新しい電子デバイスを

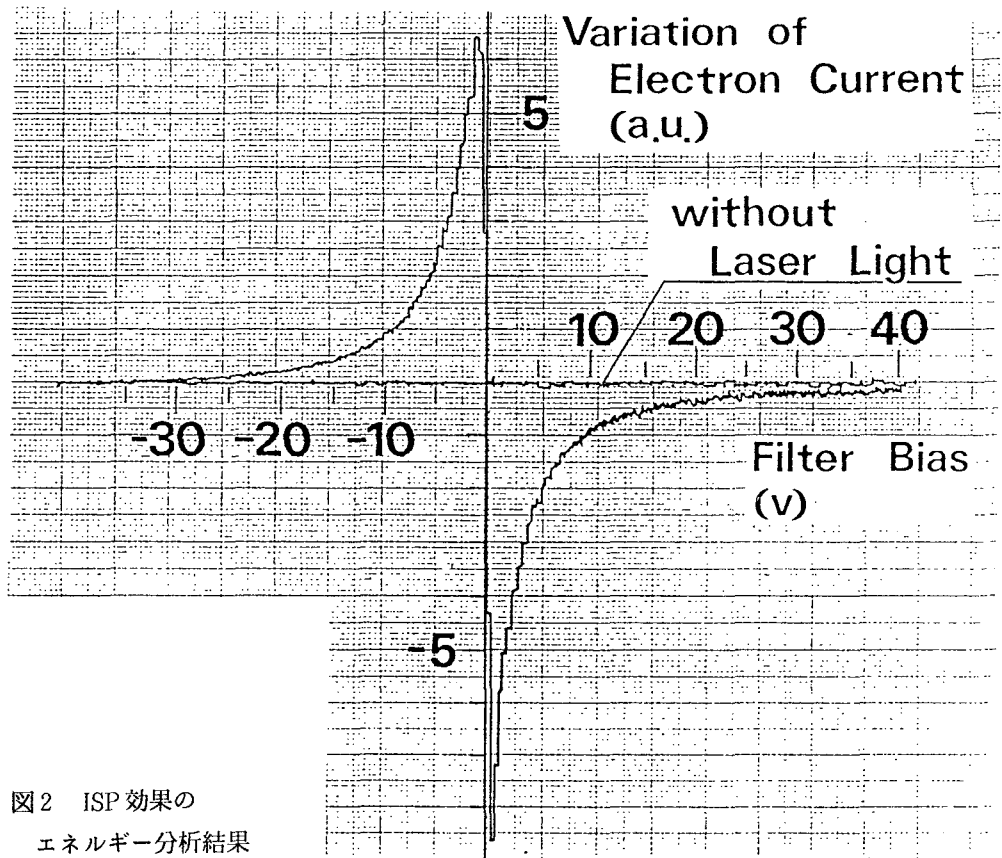


図2 ISP効果の
エネルギー分析結果

開発するときの基礎データとなるものと考えられる。

審 査 結 果 の 要 旨

近年、レーザー研究の進展に伴いその出力光の作り出す電界強度は数 GV/m 以上になってきている。これを荷電粒子の加速に応用すると加速勾配（単位長当りのエネルギー利得）の非常に大きな加速器を作り得る可能性があり、注目されている。逆スミス・パーセル効果はこのレーザー加速器の1方法として提案されたもので、金属回折格子をその相互作用部として用いている。本論文は、この効果の存在を実験的に検証するために行われた一連の研究成果をまとめたもので、全編5章よりなる。

第1章は、緒論である。

第2章では、逆スミス・パーセル効果について詳細な理論解析を行い、その検証をサブミリ波帯で行う為に必要な回折格子の設計法又レーザー出力とエネルギー利得との関係等について論じている。特に電子と相互作用する回折格子上のエバネッセント波の張り出しが、位相速度の増加と共に広がることを示しているが、これは将来の加速器への応用を考える時重要な知見である。

第3章では、駆動用のサブミリ波レーザーの開発について述べている。先ず、光励起型サブミリ波の励起光源として、メカニカルチョッパーを用いたQスイッチとそれに同期したパルス放電励起を組み合わせたEMQスイッチCO₂レーザーを開発した。次いで、それを用いて波長496μmのCH₃Fレーザーにより、本研究の実験に充分使用し得る値の出力及び繰り返しを得ている。

第4章は、逆スミス・パーセル効果の実験的検証を述べたものである。先ず第2章の理論解析の結果に基づき、櫛の歯断面を有する金属回折格子を±2μmの寸法精密で製作し、次いで、中心エネルギー80keVの電子ビームのエネルギーを0.8eVの分解能で分析出来る逆電界型の電子エネルギー分析器を設計製作している。これらの周到な準備の元に第3章で開発したレーザーを駆動源として、逆スミス・パーセル効果の検証に初めて成功し、電子速度、レーザー波長、そして回折格子ピッチ間の同期条件式の成立を実験的に確認している。又、レーザーパワーに対する電子エネルギーの広がりについて測定し、その傾向が理論と一致することを明らかにしている。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、レーザー光と電子ビームとの相互作用を得るために提案された逆スミス・パーセル効果について、理論解析を行い、次いでそれに基づいて各種実験装置の開発を行って、初めてその実験的検証に成功するまでの研究成果をまとめたもので、電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。