

## 二国間交流事業 共同研究報告書

平成 23 年 4 月 11 日

独立行政法人日本学術振興会理事長 殿

共同研究代表者所属・部局 東京大学・生産技術研究所

職・氏名 (ふりがな) 教授・平川一彦 (ひらかわ かずひこ)

1. 事業名 相手国 ( フランス ) との共同研究 振興会対応機関 ( CNRS )
2. 研究課題名 半導体量子構造中のテラヘルツキャリアダイナミクスの解明とその応用に関する研究

3. 全採用期間

平成21年4月1日 ~ 平成23年3月31日 ( 2年0ヶ月)

4. 研究経費総額

(1) 本事業により交付された研究経費総額 5,000 千円

初年度経費 2,500 千円、 2 年度経費 2,500 千円、 3 年度経費            千円

(2) 本事業による経費以外の国内研究経費総額 1,200 千円

5. 研究組織

(1) 日本側参加者

氏名 <small>(ふりがな)</small>	所属・職名	研究協力テーマ
平川一彦	東京大学生産技術研究所・教授	半導体超格子のテラヘルツ分光および研究 とりまとめ
柴田憲治	東京大学生産技術研究所・助教	半導体超格子の結晶成長
井原章之	東京大学生産技術研究所・特任助教	半導体超格子のテラヘルツ分光
酒瀬川洋平	東京大学生産技術研究所・大学院学 生 D3	半導体超格子の交流大振幅動作
鵜沼毅也	名古屋大学・助教（東京大学生産技 術研究所・協力研究員）	半導体超格子のテラヘルツ分光

(2) 相手国側研究代表者

所属・職名・氏名 Ecole Normale Supérieure・Professor・Bastard Gerald

(3) 相手国参加者（代表者の氏名の前に○印を付すこと）

氏名	所属・職名（国名）	研究協力テーマ
○Gerald Bastard	Ecole Normale Supérieure・教授	半導体超格子のレーザ励起と電子ダイナミ クスに関する理論
Robson Ferreira	Ecole Normale Supérieure・准教授	半導体超格子のレーザ励起と電子ダイナミ クスに関する理論
Francesca Carosella	Ecole Normale Supérieure・研究員	量子カスケードレーザ構造中の散乱とサブ バンド間遷移に関する研究
Jairo Ricardo Cardenas Nieto	Ecole Normale Supérieure・大学院生	半導体超格子のレーザ励起と電子ダイナミ クスに関する理論

## 6. 研究概要（研究の目的・内容・成果等の概要を簡潔に記載してください。）

テラヘルツ（THz）領域の電磁波は、イメージング、セキュリティ、化学、薬学、バイオ研究など様々な応用が期待されている。しかし、今後のさらなる応用展開には、コンパクトな固体 THz 光源や検出器の開発が急務である。また、THz 領域は、半導体量子構造中の様々なエネルギーや時間スケールと整合するため、量子デバイス構造の物理を明らかにする上でも非常に有効な周波数領域である。我々は、江崎玲於奈博士らが 1970 年に提案した半導体超格子を用いたブロッホ発振器に注目し、研究を進めている。半導体超格子中のブロッホ振動はテラヘルツ領域で可変であり、また室温でも利得を有するという点で他の THz デバイスにはない特徴を有している。このような背景の下、本共同研究では以下の 3 の点に注目し、研究を遂行した。

### 1) 半導体超格子に光励起された電子の伝導ダイナミクスの解明:

半導体超格子中におけるブロッホ振動の位相は、電子がテラヘルツ電磁波を増幅するための利得を持つのかどうかを決定する極めて重要なファクターである。我々は、フェムト秒レーザーパルスを用いた時間分解テラヘルツ分光法により、ブロッホ振動する電子のダイナミクスの実験を進めてきた。一方、それに対して、フランス側では、半導体超格子中に光が入射したときの電子、正孔と光電界の相互作用、さらにテラヘルツ電磁波への変換について、第一原理的な計算により検討を行った。その結果、テラヘルツ放射の励起スペクトルの形状や励起子が果たす役割が明らかになったが、ブロッホ振動の位相については、今後さらに実験の過程と理論の関係などを検討していく必要があることもわかった。

また、レーザーの励起波長を変化させ、超格子のミニバンドの上端よりも大きな光エネルギーのレーザー光で励起すると、キャリアを注入しているにもかかわらず、伝導が発生しないという特異な現象を見いだした。この現象は、超格子のブリルアンゾーン内に均一に電子を光注入すると、電子の分布関数を電界により変化させることができないと言う物理に起源を持ち、固体中のバンド伝導の機構に新しい知見をもたらすものである。

### 2) 電流駆動ブロッホ発振器の実現に向けた超格子の交流大振幅動作の確認:

半導体超格子を電流駆動ブロッホ発振器に応用する場合、超格子自身が持つ微分負性抵抗のために、高電界ドメインが発生し、内部電界を一様に保てないという本質的な問題がブロッホ発振器の実現を阻んできた。この問題を解決する方法として、サブテラヘルツの高周波強電界で超格子を駆動する交流大振幅動作が有効であると提案されている。我々は、超格子にアンテナ共振器を作製し、福井大学のジャイロトロンからの 400 GHz の強力な放射を用いて、交流大振幅動作の原理を確認し、高電界ドメイン抑制と電流駆動ブロッホ発振器の実現に向けて有益な知見を得た。

### 3) 現実的な量子デバイス構造に対するテラヘルツ共振器の設計:

電流駆動型ブロッホ発振器の実現には、超格子を高性能テラヘルツ共振器に入れることが有効である。我々は、半導体結晶表面にフォトニック結晶電極を形成するという比較的簡単な素子構造で、TM モードのテラヘルツ光に対して、フォトニックバンドギャップを実現することに成功した。さらに欠陥モードを導入して、モード体積の極めて小さなフォトニック結晶微小共振器を実現できることを提案した。この構造は THz 帯量子カスケードレーザーにも応用でき、THz 帯発光デバイスの高性能化に貢献する成果である。