

Measurement of femtosecond electron bunch using ultrafast carrier phenomena

K. Kan¹, J. Yang, T. Kondoh, K. Norizawa, Y. Yoshida

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, 8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

Abstract

A measurement of femtosecond electron bunch using ultrafast carrier phenomena in semiconductors, such as GaAs and AlGaAs, was proposed. In this paper, the ultrafast phenomena induced by an electron beam in GaAs were investigated. Excited carriers in GaAs induced by an electron beam were observed by a luminescence and transmission spectrum. Furthermore, reflection change by the excited carriers was measured at the wavelength corresponding to the band gap in GaAs.

超高速キャリア現象によるフェムト秒電子線パルス測定の可能性

1. はじめに

阪大産研では、レーザーフォトカソードRF電子銃、S-バンド加速管、磁気パルス圧縮器を導入し、フェムト秒電子線パルスの発生とフェムト秒パルスラジオオリシスの開発を行っている。現在、100 fsの電子線パルスを発生しているが、パルスラジオオリシスの時間分解能を向上するためには、100 fs以下の電子線パルス幅測定技術が必要である。しかし、100 fs以下のパルス幅には、ストリークカメラによる測定は適用できないため、新しい測定手法が不可欠である。そこで、本研究では、半導体 (GaAs, AlGaAs 等) の超高速キャリア現象を用いた電子線パルス幅計測を提案し、その可能性について研究を行った。

半導体における、超高速キャリア現象はフェムト秒レーザーを用いた光励起によるポンプ・プローブ実験で研究されてきた[1]。フェムト秒レーザーを半導体表面に照射すると、電子が荷電子帯から伝導帯へ励起される。励起された電子は荷電子帯からの遷移を防ぎ、その結果半導体でのバンド間遷移による光吸収が減少し、反射率の増加がレーザー照射と同時に起こる。さらに、励起された電子は、伝導帯内か荷電子帯へ遷移し、バンド間遷移による光吸収が増加し、その結果反射率が減少する。電子線誘起で同様な現象を観測することができれば、反射率が透過率の増加の立ち上がり時間により、パルス幅測定を行うことができると考えられる。

そこで、本研究では、阪大産研L-バンドライナックからの電子線パルスを用いて、GaAsの反射率変化について研究を行った。

2. 電子ビーム励起による反射率変化測定と計算式

図1に電子ビーム励起による反射率変化測定システムの光学系を示す。L-バンドライナックからの電子ビームと同期したXeランプの分析光を空气中で

GaAsへ照射した。電子ビームのエネルギーは22MeV、パルス幅は30ps、電荷量は12.5nCであった。XeランプはGaAs上で焦点を結び、偏光板を通り、分光器とSiフォトダイオード(PD)により検出される。GaAsによる発光はXeランプの光量よりも非常に大きく、測定ノイズとなるので偏光板により、電子ビームによる発光が検出されにくいように調整を行った。

反射率が電子ビーム励起により変化するとすれば、反射率変化($\Delta R/R$)は次式により定義できる。

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{I}{I_0} - 1 \quad (1)$$

ここで、 I は電子ビーム照射時の光量、 I_0 は電子ビーム照射がないときの光量である。

表1に反射率変化を測定するための、測定項目を示す。パルスラジオオリシスを行う場合と同様な測定、つまり、電子ビームの照射とXeランプの照射の有無を組み合わせ、PDによる測定を行えばよい。さらに、反射率変化は表1に示すような、4種類の測定項目(LB, B, L, Back)を用いて、(1)式を次のような式であらわすことができる。

$$I = LB - B \quad (2)$$

$$I_0 = L - \text{Back}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{I}{I_0} - 1 = \frac{LB - B}{L - \text{Back}} - 1$$

この式によると、Xeランプと電子ビームを照射したときの光量(Xeランプ+電子ビームによる発光+反射率変化)から、電子ビームのみを照射したときの光量(電子ビームによる発光)を引いた時の差が変動すれば、反射率変化がおこることを意味している。

¹ E-mail: koichi81@sanken.osaka-u.ac.jp

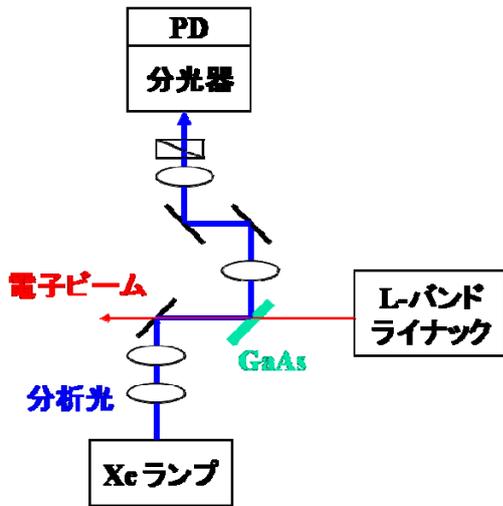


図1. 反射率変化測定システム

表1. それぞれの測定項目と電子ビーム照射およびXeランプの照射の有無

測定項目	Light +Beam (LB)	Beam (B)	Light (L)	Background (Back)
電子ビーム	○	○	×	×
Xeランプ	○	×	○	×

ただし、○は照射あり、×は照射無しとする。

3. 測定結果

3.1 発光スペクトルの測定結果

図2に、GaAsの電子ビームによる発光スペクトルと分光光度計により得られた透過率スペクトルを示す。電子ビームの電荷量は12.5nC、パルス幅は30psであった。発光スペクトルの強度は、PDで測定されたオシロスコープのピークの値を用いた。バンドギャップ間エネルギーは1.4eVであり、波長に換算すると870nmとなる。発光スペクトルは890nmにピークが観測された。透過率スペクトルの測定では、920nmにおいて大きな減少が見られた。よって、電子ビーム励起により伝導帯へ励起キャリアが生成され、励起キャリアは熱化により伝導帯端に遷移する。その結果、発光スペクトルでは、伝導帯-荷電子帯間のバンド間遷移により、バンドギャップに相当する波長の近辺でピークが観測された。透過率スペクトルでは、920nmにおける長波長領域ではバンドギャップ間遷移の減少により透過率の増加、短波長領域ではバンドギャップ間の遷移の増加により透過率の大きな減少が観測された。以上の結果から、電子ビーム励起により、キャリアが生成することと、

それによる発光が確認された。

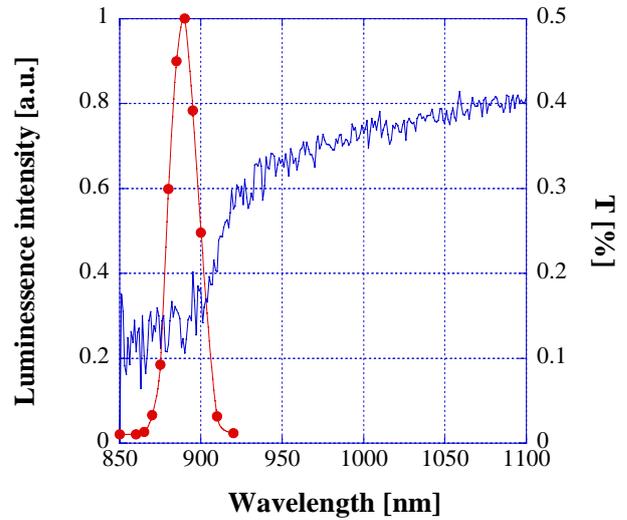


図2. 電子ビーム励起によるGaAsの発光スペクトル(赤)と分光光度計による透過率スペクトル(青)

3.2 反射率変化の測定結果

発光スペクトルの測定結果から、励起キャリアは熱化した後に、伝導帯端に分布することが得られ、荷電子帯-伝導帯のバンドギャップ間遷移に相当する近辺の波長(880nm)で、反射率変化の測定を行った。

880nmにおける発光は大きくノイズとなる可能性があるため、分光器前の偏光板を調整することにより、PDで測定される発光を小さくした。その結果、GaAsによる発光は偏光特性が観測され、Xeランプの観測される光量が最大となる偏光板の角度と、発光の観測される光量が最低となる偏光板の角度は、30°のずれがあった。そこで、偏光板は発光の光量が最低となる角度で測定を行った。これは、GaAsのサンプルの角度や、検出器に対する面方位などに依存するためであると考えられる。

図3に、880nmにおける、30回積算の電子ビームとXeランプの測定結果を示す。それぞれの曲線は表1に示すような4種類の測定をPDにより測定した結果である。図3において、Lは電子ビームと同期されているXeランプのみの測定であり、20nsの時間領域では定常光源とみなすことができる。LBはXeランプに電子ビームによる発光と反射率変化を足し合わせたものである。Bは電子ビームのみの発光である。Backはいずれも照射しないときのものである。LBとBでは、電子ビームによる発光が観測され、電子ビームはほぼ0nsに照射されていることがわかる。

図4に、図3の結果を(2)式により計算したIとI₀の計算結果を示す。Iは電子ビームの照射時(0ns)に変化がみられることから、電子ビームの照射と同時に反射率が変化しているために、変動が観測された。また、I₀はほぼ変化がない。

図5に、880nmにおける、12.5nCと15nCの電子ビー

ム励起による反射率変化の計算結果を示す。電荷量の高い方が、大きな反射率変化が観測された。この結果、電子ビーム励起により、伝導帯に励起されたキャリアは熱化した後で伝導帯端に分布し、ほぼバンドギャップに相当する波長(880nm)における反射率変化が確認された。

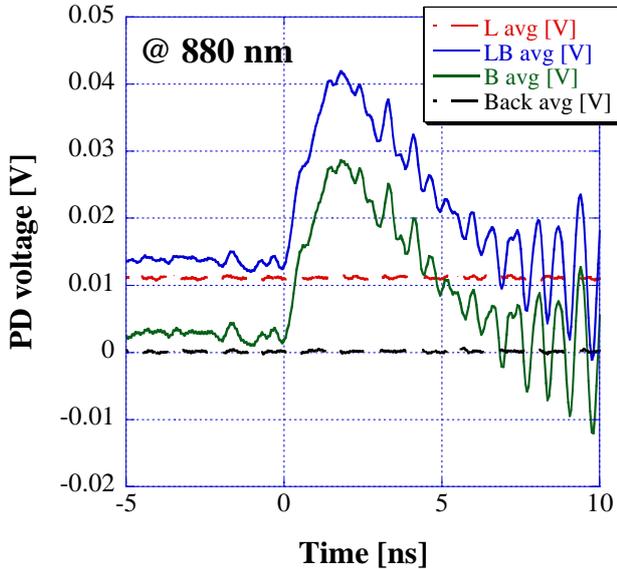


図3. 880nmにおける電子ビームとXeランプの測定データ

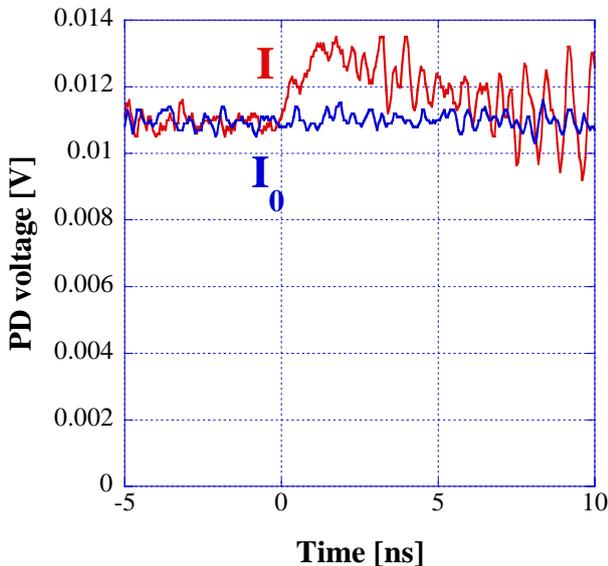


図4. I と I_0 の計算結果

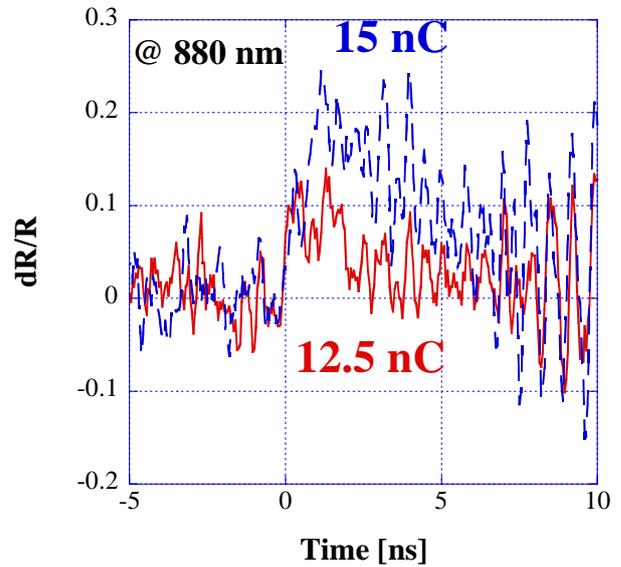


図5. 電子ビーム励起によるGaAsの反射率変化

4. まとめと今後の展望

本研究では、超高速キャリア現象による電子線パルス幅測定の可能性について検討した。電子ビーム励起によりキャリアのバンド間遷移による発光が観測された。そのことから、電子ビーム励起においても、レーザー励起と同様に、励起キャリアが生成されることが示された。さらに、電子ビーム励起により熱化したキャリアが伝導帯のバンド端に存在し、そのキャリアによる反射率変化が観測された。

今後は、レーザーフォトカソードRF電子銃ライナックにおいて、フェムト秒レーザーを用いた測定を行い、電子ビーム励起によるキャリアの励起過程を研究する予定である。L-バンドライナックにおけるピーク電流は、電荷量が12.5nC、パルス幅が30psの時、0.42 kAであったが、フォトカソードRF電子銃ライナックにおいては、例えば、電荷量が0.1nCパルス幅が100fsとすると、1 kAとなり、励起直後の密度は約2倍と見積もられる。また、本研究での時間分解能は、PDの時間分解能(>1ns)であるが、フェムト秒レーザーを用いたストロボスコープ法で行えば、時間分解能は向上し、S/Nが改善されると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、加速器の運転、調整を行って下さいました加速器量子ビーム実験室の方々、半導体サンプルの提供と物性等のアドバイスを下さいました大阪大学産業科学研究所-朝日研の方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] F. Ganikhanov et al., Phys. Rev. B, 60, 8890 (1999)