

## 発光デバイスのプロトン照射効果測定

権田 俊一\*・津々美 裕之\*・伊藤 慶文\*\*・石神 龍哉\*\*  
久米 恭\*\*・菅 博文\*\*\*

### Measurements of Proton Irradiation Effects in Light Emitting Devices

Shun-ichi Gonda\*, Hiroyuki Tsutsumi\*, Yoshifumi Ito\*\*, Ryoya Ishigami\*\*,  
Kyo Kume\*\*, Hirofumi Kan\*\*\*

A measurement system for proton radiation effects in light emitting devices such as light emitting diodes and semiconductor lasers are described. 10-MeV and 200-MeV proton beams in the Wakasawan Energy Research Center are utilized. Current vs. voltage characteristics, current vs. light output characteristics and spectra can be measured using an integration sphere, a Si photodiode, a data logger and a spectrometer. In the case of 200-MeV irradiation, remote measurement is conducted.

#### 1. はじめに

発光ダイオードや半導体レーザなどの発光デバイスは小型、軽量、高効率、使い勝手のよさなど他の発光デバイスにない特徴をもっている。このため宇宙や原子炉内など放射線環境下での利用が検討されている<sup>1)</sup>。しかし、半導体発光デバイスに多量の放射線を照射すると、デバイス特性の劣化を招き、場合によっては使用不能になることがある。放射線としては、ガンマ線、電子線、ニュートロンビーム、プロトンビームなどがあるが、影響が大きいのはプロトンである。そこで、各種の発光デバイスにプロトン照射し、特性変化を測定して照射効果の全体像をつかみ、その原因を検討してより放射線耐性の高いものを開発できるようにすることが必要である。この目的のために、われわれは各種の発光デバイスにプロトン照射して、発光デバイスの基礎特性である電流—電圧特性、電流—光出力特性、分光特性（スペクトル）の変化をしらべ、これを解析する研究を行っている。ここでは、プロトン照射の方法、特性変化の測定方法と装置および測定例について報告する。

#### 2. プロトン照射と特性測定装置

##### 2.1 測定装置製作の要件

プロトン照射効果の測定装置の製作にあたっては、以下の考え方のもとで行った。前提条件は、プロトンビーム源としては、若狭湾エネルギー研究センター（福井県敦賀市）の多目的加速器シ

\* 宇宙通信工学科 \*\* 若狭湾エネルギー研究センター \*\*\* 浜松ホトニクス

システムを用いる。同システムのプロトンビームのエネルギーは 10MeV および 200MeV である。一方、測定試料のマウント及び照射前の予備測定は福井工業大学（福井市）で行うことになる。この研究は教育研究の一環でもあり、マシンタイムも限られているので、短期間で準備する必要がある。しかも、準備期間がなかったので予算措置は限られたものである。したがって、(1) 測定装置は福井一教賀間の運搬、設置、解体が容易なように極力小型、軽量であること、(2) 測定器の準備、装置の組み立てを3ヶ月程度で終了すること、(3) 測定方法は理解しやすく容易であること、(4) 放射線環境下での測定であるので、場合によっては遠隔測定が出来るようにしておくこと、(5) 装置整備の費用が極力かからないようにすること、これが基本的な要件である。

## 2.2 プロトンビームとその照射

若狭湾エネルギー研究センターの加速器系と照射室配置を図1示す。イオン源部でつくられた負水素をタンデム加速器に入射して加速し荷電変換により 10MeV のプロトンを得る。10MeV プロトンの照射実験は照射室2で行った。さらに高エネルギープロトンが必要な場合は、タンデム加速器から出射した 10MeV プロトンをシンクロトロン加速器に入射し、最高 200MeV まで加速することができる。200MeV プロトンの照射実験は照射室4で行った。

加速器系と照射室は地下にあり、加速器の運転・操作は地上の加速器制御室で行う。照射した試料の特性測定は、遠隔測定が出来る場合は地上の加速器制御室で行うが、出来ない場合はプロトンビームを止め、照射室に入って行った。

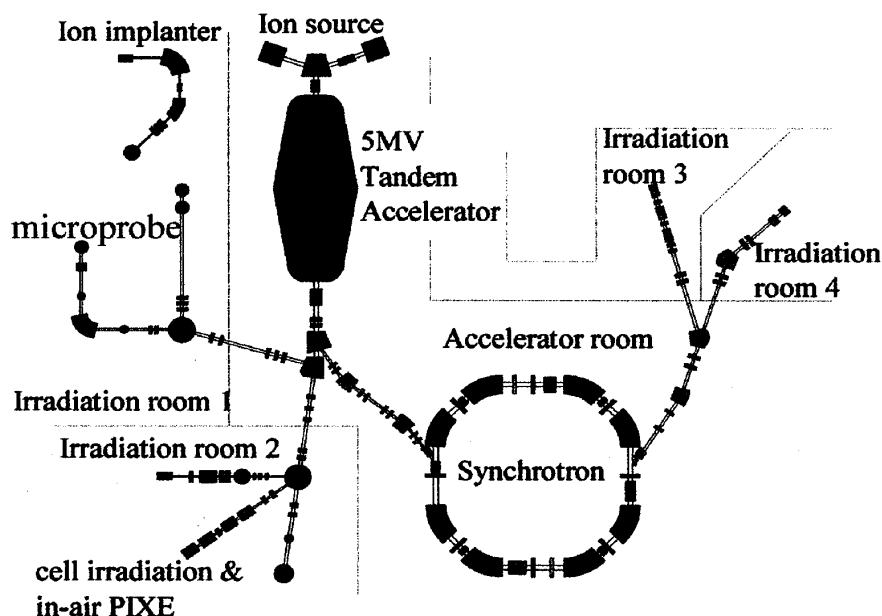


図1 若狭湾エネルギー研究センターの多目的加速器システム

(1) 10MeV 照射 10MeV の照射実験は、エネルギーの低いプロトンビームと大気との衝突をさけるため、真空槽内で行った。図2は照射実験装置の概略図である。半導体試料は図3の試料

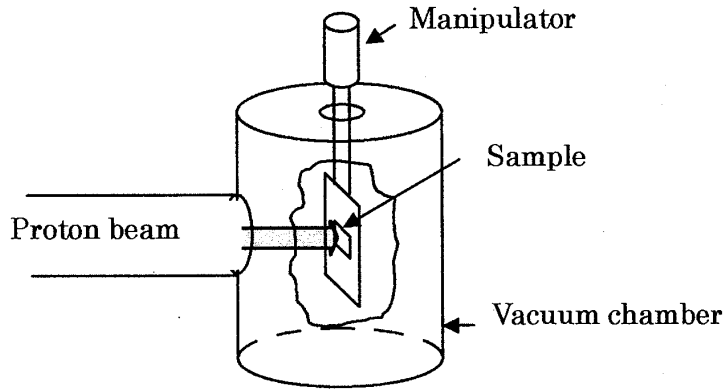


図2 10MeVプロトン照射実験装置

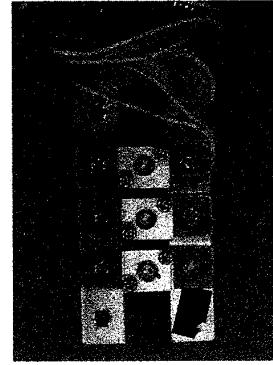


図3 10MeVプロトン照射用試料治具

治具に装着し、これをマニピュレータに直結した。マニピュレータは上下左右、回転の遠隔操作が可能である。図3の中央の円形部分が発光デバイスで発光部が正面になるように装着してある。したがってプロトンビームは発光面に垂直に照射される。この図では3個のデバイスがつけてあり、上下に位置を移動してそれぞれに必要量だけプロトンを照射し、照射後は試料治具を真空槽から取り出して、照射室2の隣の実験室で特性測定を行った。

プロトンビームは10mm×10mmに走査した。照射面積を確かめるために、試料への照射前に、照射部分に変色するカプトンを治具につけ、変色部分を実測して面積の補正を行った。試料の奥行きは高々2mm程度である。10MeVプロトンビームは試料後部でとまるか、あるいは突き抜ける。試料背後に金属板を配し、プロトンは全部治具で吸収されるようにし、外部から電圧を加えて治具に流れ込むプロトンの電流を測定した。これから照射量  $p/cm^2$  ( $1cm^2$ あたりのプロトン入射数) を計算した。

(2) 200MeVプロトン照射 10MeVのプロトンビームをシンクロトロン加速器に入射して200MeVまで加速する。図4にシンクロトロン加速器の運転パターンを示す。加速に時間を要するので、2秒間に1回、フラットトップ部0.5秒のパルス状プロトンビームが出射される。

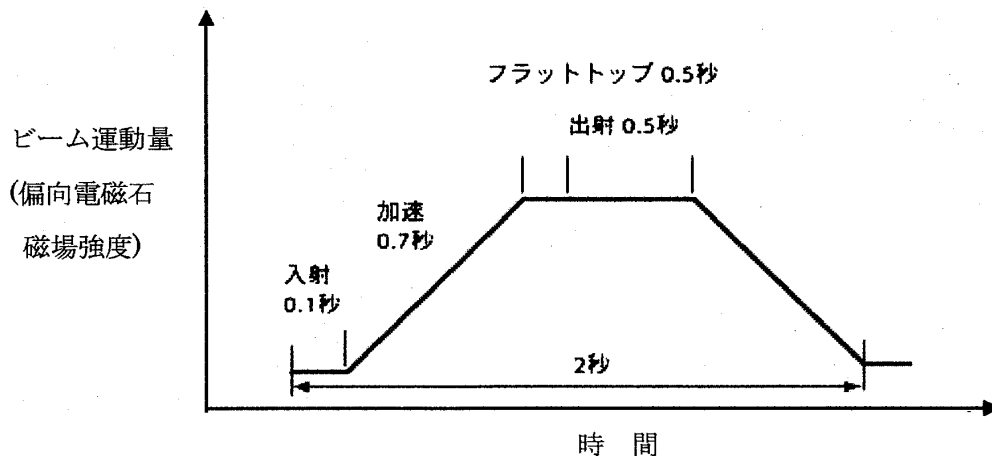


図4 シンクロトロン加速器の運転パターン

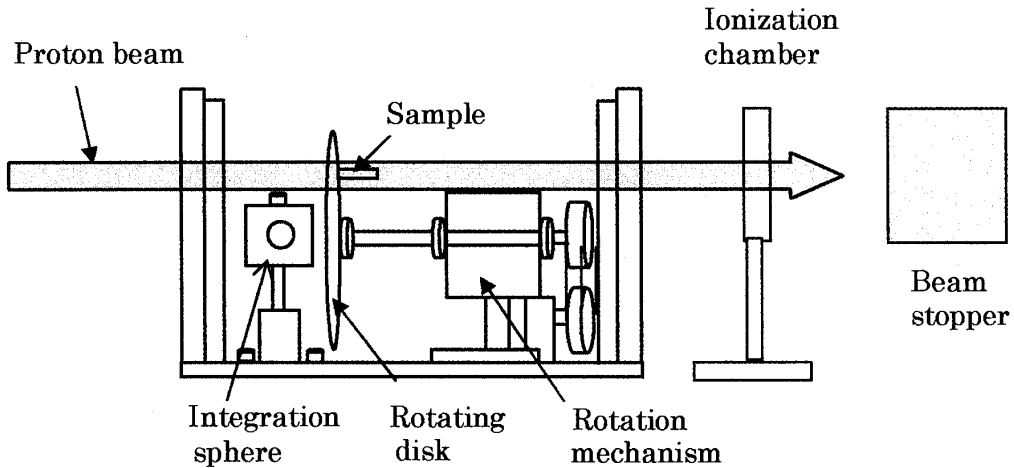


図5 200MeV プロトン照射実験装置

200MeV プロトンはエネルギーが大きく大気中の減衰が少ないので、照射は大気中で行った。図5に照射実験装置の概略を示す。回転できる円板に発光デバイス試料を発光面がプロトンビームに対向するように取り付け、円板の最上部に試料がある場合にプロトンを照射する。シンクロトロン加速器から出射したプロトンビームは $1\text{cm}^2$ の孔をあけた銅ブロックでコリメートされ、試料を透過し、電離箱を経由してビームストッパー（銅ブロック）で吸収される。照射量は、電離箱で得られる電流パルスをカウントし、カウント数を校正実験で行った測定値と照合して校正し $1\text{cm}^2$ あたりのプロトン入射数( $\text{p}/\text{cm}^2$ )を単位として表示した。所定の量を照射したら、円板を回転し試料を積分球の前に移動し、デバイスに電流を流して発光させ、諸特性を測定し、再び試料を照射位置に移動して照射を行った。

図6に200MeV用試料治具と高出力半導体レーザを示す。左図は正面から見た全体像で下の黒の部分はヒートシンクでこの部分を回転円板にねじ止めする。右図はレーザ部付近の拡大図である。矢印の部分は $0.8\mu\text{m}$ 帯レーザ素子および $0.68\mu\text{m}$ 帯レーザ素子である。レーザ本体は正面の面積が約 $0.5 \times 0.3\text{mm}^2$ で、奥行きが約 $1\text{mm}$ の微小なものである。円内の部分はプロトンビームが照射される部分である。

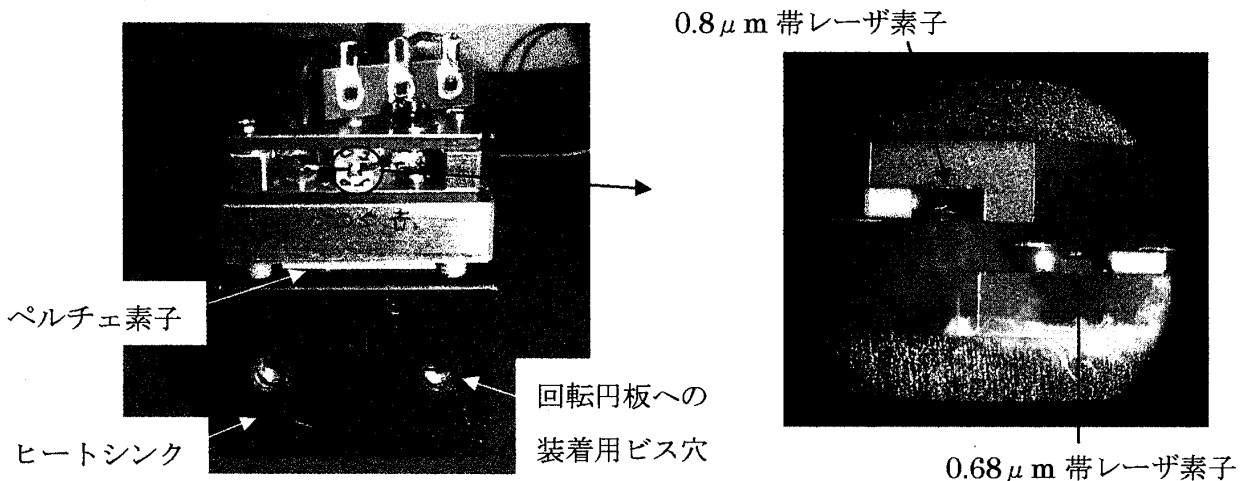


図6 200MeV用照射治具 左：正面図 右：拡大図

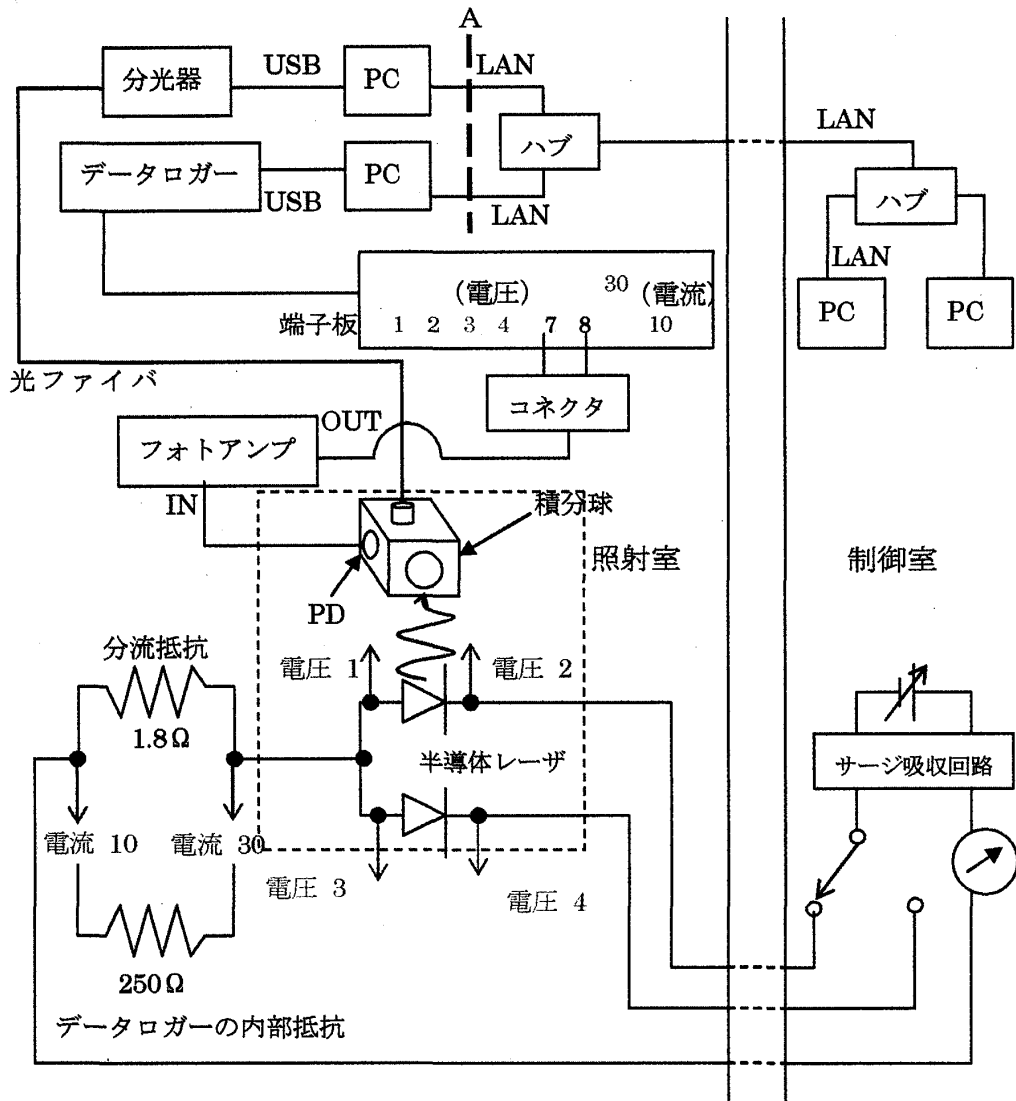


図7 レーザ特性測定回路 (200MeV 遠隔測定用)

### 2.3 特性測定回路と装置

200MeV 遠隔測定用の電流—電圧特性、電流—光出力特性、分光特性の測定回路と装置の概略図を図7に示す。左側は二つの半導体レーザを順次測定する系で、照射実験を行うときに毎回、地下の照射室に設置した。半導体レーザと積分球 (Labsphere 3p-GPS-020-SL) とそれに取り付けてある Si フォトダイオード (PD、浜松ホトニクス S2281) は図5の照射実験装置内にあり、他は照射中に被放射物からの2次放射線の影響を避けるため、図5の装置から10m程度はなれた位置に設置した。図7の右側は地上の加速器制御室内に置いた。可変電圧電流発生器を用いて半導体レーザに電流を流し、電圧、電流をデータロガー (KEYENCE NR500) で測定してパーソナルコンピュータ PC に表示し、発生した光を同時に積分球で受け、光の一部は PD で受光しフォトセンサアンプ (浜松ホトニクス C9329) で増幅してデータロガーにいった。光の一部は光ファイバで接続した分光器 (B&TTEK BTC112) にいれてスペクトルを測定した。照射室内の PC で測定 (破線 A より左側) を確認したのち、LAN で加速器制御室内の PC に接続し、照射を繰返しながら測定を行った。

図5の照射実験装置とPCなど測定系の間には2次放射線を防ぐため水をいれた大型のポリタンクを置いた。それでも照射室内のPCが動かなくなることがあったが、照射中断後照射室内に入りPCを再起動すると正常に復帰したので、ソフトウェアと思われる。また円板回転の制御系本体は照射室内にあるが、制御ソフトが破壊されたことがある。

照射室のPCと加速器制御室のPCとのLAN接続には遠隔操作ソフトTightVNCを用いた。これにより照射室内でまず測定状況を確認したのち、加速器制御室に移動してPCをモニター・制御できるので、この実験には有効であった。

### 3. 特性変化測定結果

#### 3.1 発光ダイオード

図8に青色発光ダイオード(日亜化学)に200MeVのプロトンを照射したときの電流—電圧特性、電流—光出力特性を示す。照射量 ( $\text{p}/\text{cm}^2$ ) の増加とともに光出力が減少している。

図9は同じ発光ダイオードの発光スペクトルの変化である。照射量の増加とともに各波長で発光強度が一様に減少しており、新しい発光中心になる欠陥の発生は少ないことがわかる。

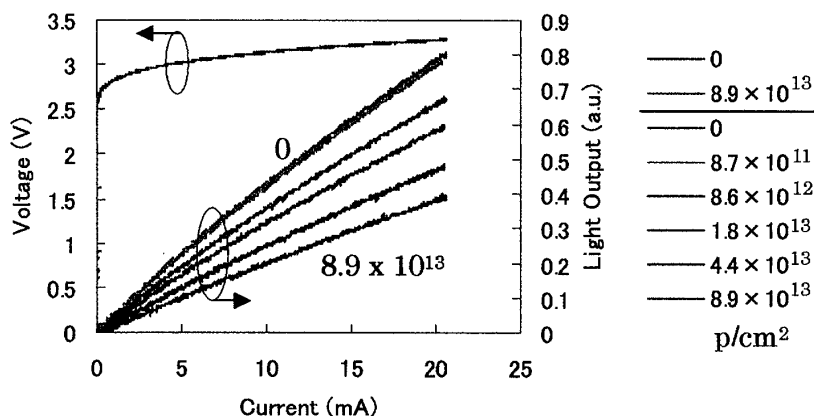


図8 青色発光ダイオードの電流—電圧特性と電流—光出力特性  
(200MeVプロトン照射)

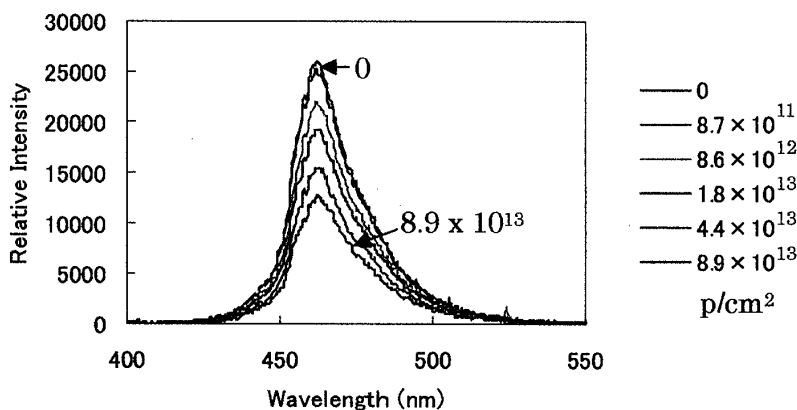


図9 青色発光ダイオードの200MeVプロトン照射時の発光スペクトル

### 3.2 半導体レーザ

各種の半導体レーザにプロトン照射を行ったが、図 10 に浜松ホトニクス製の赤色(0.68 μm)高出力レーザの正面からみた構造図を示す。

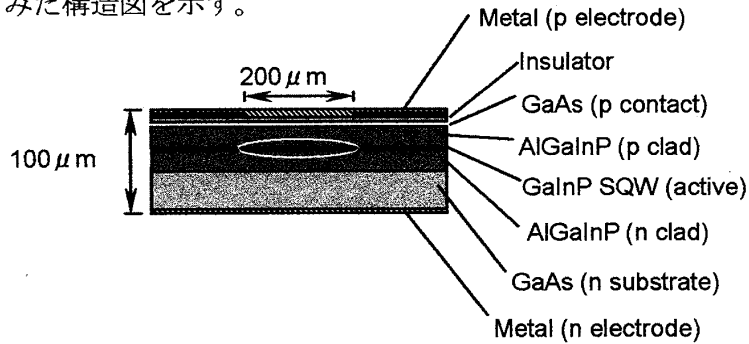


図 10 赤色高出力半導体レーザの正面からみた構造図  
(楕円部内が発光部 プロトンはこれに垂直に照射)

図 11 は赤色高出力半導体レーザの電流—電圧特性と電流—光出力特性である。照射後は電流が少し増加し、レーザ発振が生ずる閾値電流がプロトン照射量の増加とともに増加していることがわかる。図 12 は同じレーザのプロトン照射前後の発振スペクトルである。発振波長はほとんど変化しないことがわかる。

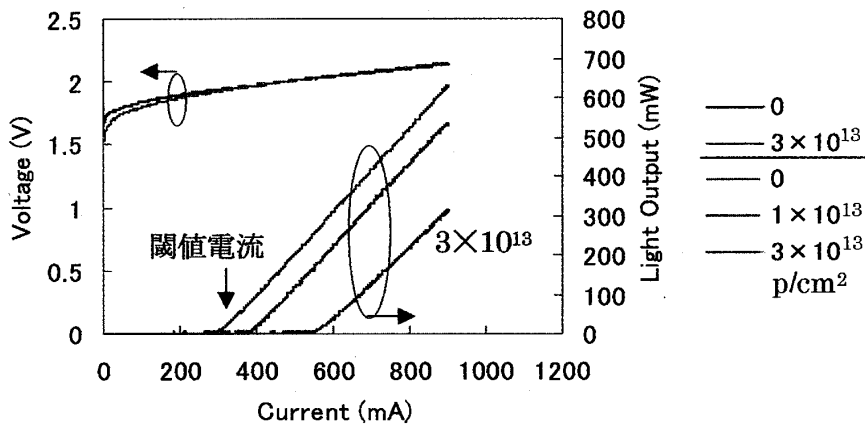


図 11 赤色高出力半導体レーザの電流—電圧特性と電流—光出力特性  
(10MeV プロトン照射)

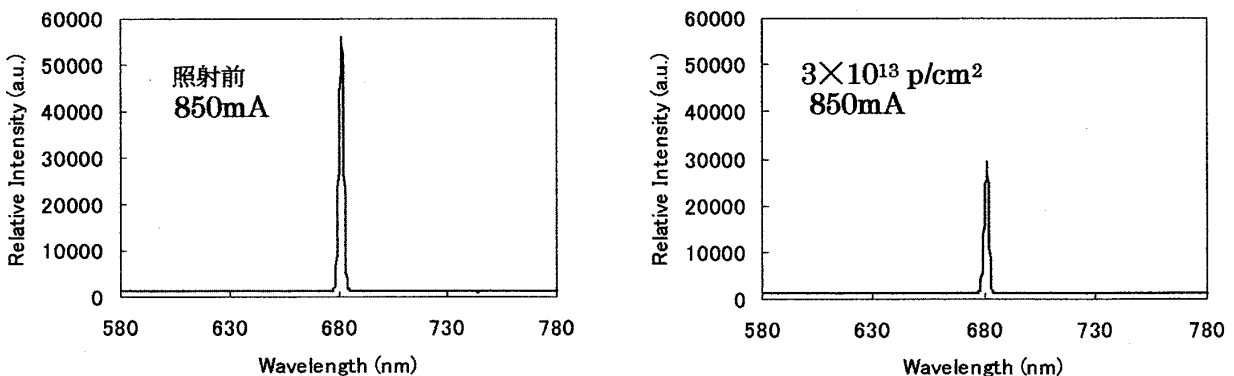


図 12 赤色高出力レーザの照射前と 10MeV,  $3 \times 10^{13}$  p/cm<sup>2</sup> 照射後のスペクトル

#### 4. おわりに

この論文では、半導体発光デバイス（発光ダイオード、半導体レーザー）に高エネルギープロトン照射を照射し、その特性変化を測定する方法と装置について重点的に述べた。実際には、まず福井工業大学(福井市)の研究室で、発光デバイスを照射治具にマウントし、照射実験時と同じ測定系を用いて特性測定を行った。その後測定系を解体し梱包して車で若狭湾エネルギー研究センター（敦賀市）へ運び、照射室内に測定系を組み立て、予備測定をしたのち照射実験と測定を行った。実験終了後は測定系を解体し、装置が放射化していないことを確認後、福井工業大学に運び、次の実験の準備を行った。実験試料は放射化しているため、センターの放射線管理区域に保管し、回復効果など追跡測定が必要な場合は、必要な装置を実験室に持ち込んで測定を行った。

この方法と装置を用いて、赤、オレンジ、緑、青の発光ダイオード、赤外、赤、バイオレットの半導体レーザーについて測定を行なった。特性変化の測定結果の一部は本論文に記載したが、測定結果の詳細や解析の結果などは、国際会議や研究会、論文誌などで報告している。これらは参考文献 2)、3)、4)、5)などを参照されたい。

本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センター、福井工業大学(金井学園)、浜松ホトニクス(株)の官学産共同研究「半導体発光デバイス照射損傷評価」の一環として行われたものである。

#### 謝辞

若狭湾エネルギー研究センターの大谷暢夫研究開発部長、安田啓介氏、加速器グループのスタッフにはいろいろご協力を頂いた。大阪大学の朝日一教授、産業技術総合研究所の板屋太郎氏、岩田拓也氏、反保衆志氏には測定器について便宜を図って頂いた。遠隔操作については荒川勝仁氏に、測定系の構成案については浜松ホトニクスの鄭宇進氏、曾根明弘氏に情報を提供して頂いた。浜松ホトニクスの森田剛徳氏、牧野貴光氏、日亜化学の向井孝志氏、富士通の山本剛史氏、東京大学の荒川泰彦教授には実験試料を提供して頂いた。福井工業大学の大山忠司教授ほかの方々には物心両面で支えて頂いた。著者のひとり(津々美)は丸文研究交流財団の研究交流助成を受けた。これらの方々に謝意を捧げる。

#### 参考文献

- 1) 高野忠、ほか著 宇宙通信および衛星放送、2001 コロナ社、p.206
- 2) S.Gonda: Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Application (Plenary paper) (2006) pp.9-14
- 3) 権田俊一、津々美裕之、伊藤慶文、久米恭、石神龍哉、牧野貴光、森田剛徳、菅博文：電気学会研究会資料、OQD-06-41 (2006)
- 4) 権田俊一、津々美裕之、伊藤慶文、久米恭、石神龍哉：第7回半導体の放射線照射効果研究会 (2006) pp.25-28
- 5) S.Gonda, H.Tsutsumi, Y.Ito, T.Mukai, S.Nagahama: Physica Status Solidi, (a) 204 (2007) pp.231-235

(平成19年 3月23日受理)