異なる直接 F S K 変調条件における 半導体レーザの周波数安定化

正員	佐藤 孝	(新潟大)
非会員	石黒 誠	(新潟大)
非会員	水本 潤一	(新潟大)
非会員	渡部 博道	(新潟大)
非会員	大河 正志	(新潟大)
正員	丸山 武男	(新潟大)
正員	榛 葉 實	(東京電機大)

Frequency Stabilization of a Semiconductor Laser under Direct FSK Modulation of Different Modulation Conditions

Takashi Sato, Member, Makoto Ishiguro, Jun'ichi Mizumoto, Hiromichi Watanabe,
Masashi Ohkawa, Non-members, Takeo Maruyama, Member (Niigata University),
Minoru Shimba, Member (Tokyo Denki University)

The traditional frequency stabilization method of a semiconductor laser using the Rb absorption line as a frequency reference is difficult under direct frequency shift keying (FSK). Moreover, if the signal is modulated by different duty ratio conditions of pulse signals, the frequency-locking point moves depending on the duty ratio. This moving frequency-locking point degrades the frequency stability. The peak-hold method, which has been devised for improving frequency stability under direct FSK, is clearly demonstrated here and its stability becomes better than that of the traditional method. However, if the direct modulation signal is not a good FSK signal or if the only one component of two FSK signals succeeds, the peak-hold method does not operate well enough. In this work, the coding system which keeps two frequency components in the signal and the waveform modifying circuit which makes a good FSK signal are introduced. The obtained frequency stability is confirmed unchanged in several modulation conditions.

キーワード：半導体レーザ，Rb 原子の吸収線，直接 F S K 変調，周波数安定化，光通信

1. まえがき

半導体レーザは、発光効率が良く、小型で安価、かつ高速で直接変調が可能であることから、オプトエレクトロニクスの様々な分野で用いられてきている。特に通信の分野では半導体レーザの持つコヒーレント性を利用したコヒーレント光通信を行うことにより、高速大容量通信が可能になると期待されている。ところが、半導体レーザは雰囲気温度や注入電流の変動により、容易にその発振周波数が変化してしまうので、コヒーレント性を維持して、次世代の光通信を実現するためには発振周波数の安定化が必要になる^{(1)~(3)}。その周波数安定度は 10 MHz で、そのとき

の発振幅は 500 kHz 以下である必要があるとの報告がなされている⁽⁴⁾。

一方、半導体レーザの発振周波数の安定化を行う際に、原子の吸収線を外部基準周波数として用いる方法が知られている^{(5)・(6)}。しかし、良く知られている変調方式の一つである FSK (Frequency Shift Keying) を行くと、半導体レーザの温度変動効果による周波数チャープングと変調に伴うサイドバンドにより、レーザ光の発振スペクトルに揺らぎと広がりが生じるため、制御信号が劣化し、安定度が低下してしまう⁽⁷⁾。そのため、変調時の半導体レーザの周波数安定化が試みられてきた^{(1)~(3)}。

我々は半導体レーザの発振周波数の安定化を、光通信シ

システムの受信側並びに送信側で用いることのできる半導体レーザ光源の開発を目的として行ってきた。受信側のシステムとしては、局部発振器の光源である半導体レーザの発振幅を広げることなく発振周波数を安定化する方法を開発してきた^{(8)~(10)}。また送信側のシステムとしては、半導体レーザの直接FSK変調時の発振周波数の安定化法として、同期受光方式^{(11)~(12)}並びにピークホールド方式を考案し、安定度の向上を試みてきた^{(12)~(16)}。

今回は、直接FSK変調を行う際の符号化方法に、RZ (Return-to-Zero) パルス信号のデューティレシオを変えるPDM-FSK (Pulse Duration Modulation-FSK) を変調方式として用いる光通信の送信システムを想定し、模擬の実験を行った。また、このとき変調パルス信号を変形させることにより、良好なFSK変調を実現した。その結果、今回用いたPDM-FSKの変調信号を変化させたどの変調条件においても、ピークホールド方式が従来方式より良い安定度を与えるとともに、変調条件により安定度が変化しないことを確認したので報告する。

2. 周波数安定化の原理

半導体レーザの発振周波数を安定化するため、本研究ではRb原子のD₂吸収線(波長780.02nm, 周波数384THz)を外周波数基準として用いた。Rb原子は、長さ5cm, 直径5cmのガラス容器に封入されており、以下これをRbセルと呼ぶ。

図1 周波数安定化の原理
Fig.1. Principle of frequency stabilization.

半導体レーザの発振周波数をRb原子のD₂吸収線付近で掃引し、そのレーザ光のRbセル透過光を観測すると図1(a)のような吸収波形が観測される。この吸収波形を周波数に関して1次微分すると図1(b)に示した微分波形が得られる。ここで吸収の最も大きい点に対応する微分波形の零クロス点Pを安定化点(基準周波数)として用いた。図1(c)は図1(b)における安定化点Pの部分を拡大したものである。今、図1(c)で、レーザ光が安定化点PからΔν離れた周波数で発振しているとすると、誤差信号ΔVを得ることができる。この誤差信号を制御信号として注入電流にフィードバックすることで安定化が行える。ここで、安定化点Pにおける接線の傾きをGdとすると、Gdは

$$Gd = \frac{\Delta V}{\Delta \nu} \quad [V/GHz] \quad (1)$$

で与えられ、これを周波数弁別利得と呼ぶ。図1(c)より、このGdが大きいと周波数差Δνが小さくても、大きな誤差信号ΔVを得ることができることになり、より高い安定度を得ることができることを意味する⁽¹⁴⁾。

図2に周波数安定化のための実験系を示す。電流源からの注入電流とレーザのケース温度を制御することで発振周波数をRb-D₂吸収線付近に合わせた。更に、注入電流に100kHzのパルス波を重畳して半導体レーザ(LD)からの出力光を直接FSK変調し、Rbセルを透過させた後、ホトダイオード(PD)により受光する。この信号を

図2 実験系
Fig.2. Experimental setup.

ロックインアンプで同期検波することによって、周波数基準からの差を表す誤差信号が得られる。この誤差信号を制御信号として半導体レーザの注入電流にフィードバックすることにより発振周波数の安定化を行う。なお、注入電流にはロックインアンプで同期検波を行うため1、2 kHzの微小正弦波電流が重畳されている。これをここでは微小変調と呼ぶ。そして、ロックインアンプの出力である誤差信号をコンピュータに取り込み、アラン分散の平方根を計算することにより安定度の評価を行う⁽¹⁷⁾。ここで、アラン分散の平方根を半導体レーザの発振周波数に掛けることで、平均的な周波数変動の幅を得ることができる。

3. ピークホールド方式の原理と変調方式

本研究では、注入電流に図3(a)に示すような方形波電流を重畳し、FSK変調を行い、FSK変調時における半導体レーザの発振周波数の安定化を行った。図3(a)のようにFSK変調時のレーザ光の発振周波数を吸収線付近で掃引させると、Rbセル透過光強度信号は図3(b)の実線で示されるように、FSK変調に応じて変動する信号となる。しかし、信号の変動が速いため、太線で示されるような変化の平均の出力に対応した波形が得られる。この波形を用いて安定化する従来方式のことをここではFUL方式と呼ぶが、無変調時の吸収波形に比べ広がった波形となるため、制御信号が劣化し、安定度が低下する。これはレーザ光の発振スペクトルが広がっていることに対応する。そこで、より鋭い基準周波数信号を得るため、我々はピークホールド方式（以下PEAK方式と呼ぶ）を考案した。これは、図3(b)のFSKにより発生する2種類の周波数の光に対応した変動する信号のうち、包絡線検波の原理によりRbセル透過後の光出力が強い信号だけから制御信号を作り出す方式である。つまり、図3(b)の信号の強い方の信号をFSKの変調周期より長く、前述した微小変調の周期よりも短い適当な時定数を持つピークホールド回路で包絡線検波し、図3(c)に示すような信号を

図3 ピークホールド方式の原理

Fig. 3. Principle of the peak-hold method.

得る方法である。この信号を周波数に関して一次微分すると、図3(d)のような一次微分波形信号が得られる。図3(d)の安定化点Pにおける傾きは急峻となり、大きな制御信号を得ることができ、安定度が向上する。しかし、PEAK方式では図3(b)に示されるように常に変調が掛かった状態、つまり二つの周波数成分を必要とし、無変調のときにはピークホールド回路の効力はなくなるという問題点がある。

次に光通信に用いられる変調方式について考える。図4(a)に示されるのが強度変調であり、光の“強”と“弱”又は“有”と“無”を信号の“1”と“0”に対応させる変調方式であるが、レーザ光の持つコヒーレント性を利用した変調方式ではない。図4(b)に示されるのがレーザ光のコヒーレント性を利用した変調方式の一つであるFSK変調であり、発振周波数の“高”と“低”を信号の“1”と“0”に対応させる変調方式である。図3の原理の所では、この“1”と“0”が交互にくるパルス波を用いて議論していたことになる。しかし、この方式では信号“1”又は“0”が連続すると無変調の状態と同じように一つの周波数成分のみの光となってしまう、我々が考案したPEAK方式の有効性が失われてしまうという欠点がある。そこで図4(c)に示されるようなPDM-FSKを用いる

図4 変調方式

Fig. 4. Modulation scheme.

ことを検討した。これは、RZパルス信号の考え方をういて、二つの周波数成分で一つの信号を表し、高い周波数成分の持続時間でデューティレシオを定義し、例えば、デューティレシオ2/3を“1”，デューティレシオ1/3を“0”とする変調方式である。これにより、常に変調が掛かった状態を維持することができ、上記の欠点を克服することができる。

4. 良好なFSK変調の実現

変調周波数が1MHz以下の低周波数領域においては、半導体レーザのFM変調を引き起こす主要因は温度変動効果である。本研究では、100kHzのパルス信号によりFSKを行っているの、温度変動効果により発振周波数が変調されている。しかし、変調電流が変化しても温度の変化はゆっくりなため発振周波数の変化もゆっくりとなる。Rb吸収線付近でRbセル透過光強度信号を観測すると、図5に示されるように信号の立上がり、即ち周波数変化の立上がりがゆっくりとなっていることがわかる。そこで、変調パルス信号を変形させることで波形整形することを考え、方形波にその一次微分信号を重ねる方法を用いた波形整形を行ってきた⁽¹⁵⁾。今回は、より単純に図6(c)に示す回路を用いて、図6(a)，(b)のように変調パルス信号を変形させることにより、良好な透過光強度信号の立上がり、即ち急峻な周波数変化を得て良好なFSK変

(a) FULL method

(b) PEAK method

図5 FSK波形（波形整形なし，デューティレシオ=1/3）

Fig. 5. FSK waveform (No waveform modification, duty ratio = 1/3).

調を実現した。

ビート信号を用いて観測したこの時のスペクトルを図7に示す。波形整形しない場合の図7(a)では、2本の周波数成分間にも連続した周波数成分が観測され、良好なFSK変調が行われていないことがわかる。しかし、波形整形することにより図7(b)で示されるような2本に分かれたスペクトルが観測され、二つの周波数成分に分かれた良好なFSK変調が実現されていることがわかった。

5. 周波数安定化の実験

今回用いた半導体レーザは、しきい値電流は34mAであり、レーザ温度13.5℃、注入電流71mAでRb-D₂線付近で発振する。レーザ温度は、温度コントローラで0.01℃以内に制御されている。今回の実験ではFS

(a) FULL method

(b) PEAK method

(c) Modifying circuit

図6 FSK波形と波形整形回路（波形整形あり，デューティレシオ=1/3）

Fig. 6. FSK waveform and modifying circuit (waveform modification, duty ratio = 1/3).

(a) Unmodified modulation waveform
(Duty ratio = 1/3)

(b) Modified modulation waveform
(Duty ratio = 1/3)

図7 ビート信号

Fig. 7. Beat notes.

K変調の周波数を100kHz、変調による周波数シフト Δf を前述したPEAK方式で安定度が最適となる付近の500MHzに固定して実験を行った⁽¹⁵⁾。変調は、我々の考案したPDM-FSKでの符号化に用いるデューティレシオ1/3、2/3、それに実際の情報信号を模擬するため、ここでは1/3のパルス一つに対し2/3のパルスが三つが現れるパルス列の信号を用いた。また、これらのパルス波形としては、上述の波形整形を行ったものを用いた。

まずFULL方式での安定度を図8に示す。変調を加えると無変調の場合に比べ安定度が低下しているのがわかる。しかも、デューティレシオにより安定度にばらつきがある。次に、PEAK方式を用いた場合を図9に示す。デューティレシオが1/3と2/3の場合だけでなく、二つのデューティレシオを用いたPDM-FSKの場合でも、安定度にばらつきがなく一定で、しかも無変調のときより高い安定度が得られている。

FULL方式では図10(a)に示されるようにデューティレシオが1/3と2/3の場合では、安定化点が異なっていると考えられる。このため、デューティレシオが時間的に変化するPDM-FSKの場合には、安定化点も時間と共に変化する、安定度が更に低下しているものと思われる。それに対し、PEAK方式を用いると、図10(b)

—+— Unmodulation
—△— Duty ratio = 1/3
—●— Duty ratio = 2/3
—■— Duty ratio = 1/3 + 2/3

図8 FULL方式の安定度

Fig. 8. Stability in FULL method.

—+— Unmodulation
—△— Duty ratio = 1/3
—●— Duty ratio = 2/3
—■— Duty ratio = 1/3 + 2/3

図9 PEAK方式の安定度

Fig. 9. Stability in PEAK method.

に示されるようにデューティレシオに左右されずに、常に一定の安定化点を得ることができる。そして、PEAK方式では、既に述べてきたように制御信号から得られる周波数弁別利得 G_d が大きくなるため、予想通り良好な安定度(平均化時間 $\tau=1$ sで $\sigma(2, \tau)=6.5 \times 10^{-12}$)が得られている。この値から求めた平均的な周波数変動の幅 Δf (半導体レーザの発振周波数をアラン分散の平方根に掛けたもの)は、 $\Delta f=3.84 \times 10^{-14} \times \sigma=2.5 \times 10^{-3}$ Hzとなり、まえがきで述べた10MHz以下という周波数安定度に関する条件を満足している。

6. 考察

今回ここに提案した符号化以外にも、例えばPPM-F

図10 各方式による周波数安定化点
Fig.10. Frequency-locking points.

SK (Pulse Position Modulation-FSK) 等, 様々な符号化が考えられる。しかし, 結局は二つの周波数成分が交互に適当な持続時間で現れてくる訳である。これまでの実験結果から, なるべくそれぞれの周波数成分の持続時間の比が大きく変化しないような符号化が望ましいと考えられる⁽¹⁴⁾。従って, 結果は我々が今回ここに提案したPDM-FSKに近い符号化に落ち着くものと考えられる。

図6(c)の波形整形回路は, 既に報告している回路よりも単純なものである⁽¹⁵⁾。図6からは, 若干の過渡的揺らぎは見られるものの十分な波形整形が行えていることがわかる。今回は特に, ビート信号を用いて, 実際にスペクトルを観測し, 良好なFSKに近いことを直接確認した。この波形整形は, 半導体レーザの温度変動効果による周波数チャージングの効果を打ち消すために考案したものであるから, 数百MHz以上の高速変調を行う際には不必要となると考えられる。しかしここでは, 良好なFSK変調の下でPEAK方式がその特性を十分発揮するので, この波形整形を行って実験した。ただ, 半導体レーザの周波数を変化させたい様々な応用分野において, 常にこの周波数チャージングの問題はある。その様なときにもこの回路は有効であると思われる。

実験はFSK変調の周波数シフト ΔF を一定にして行っ

たが, これが変動してしまう場合も考えなければならない。変動がゆっくりとしているならば, PEAK方式の安定化点であるFSK変調の二つの周波数成分の中央値は変動しない。しかし, それぞれの周波数成分は変動してしまうことになるため, 受信側で復調する際に問題となるかも知れない。

ここでは, 誤差信号から求めたアラン分散の平方根を安定度の評価に用いている。しかし, この評価法の信頼性については問題が残っている。ここで述べた方法では, 誤差信号の高周波成分を平均化して観測しているため, この評価法を適用できる時間領域に制限が生ずる。従って今後は, 独立して安定化させた二つの半導体レーザ光, すなわち無変調の条件の半導体レーザ光と今回の方法で安定化した半導体レーザ光, を用いて得られたビート信号の変動を測定し, アラン分散の平方根をそこから求める必要がある。

最後に, PEAK方式において適用可能な変調周波数の範囲について考える。PEAK方式の原理は, 包絡線検波であり, 高周波でも適用可能である。回路的には, 変調信号の周波数と検波回路の時定数との関係だけの問題であり, 数百MHz以上の変調周波数にも対応できる。ただし, 今回のシステムでは制御信号を得るためにロックインアンプを用いているので, 速い制御は行えないという問題点は残る。より高速の制御系を用いる必要がある。

7. むすび

本研究ではRb原子の吸収線を基準周波数として用いて, 半導体レーザの直接FSK変調時における発振周波数の安定化を行った。直接FSK変調としては, 光通信システムへの応用のため, PDM-FSK変調方式を用いることを検討した。変調パルス信号のデューティレシオは1/3, 2/3, それに1/3と2/3が周期的に変化するものの3通りを用いて, それぞれ同様に安定度を測定した。得られた安定度は, 従来方式(FULL方式)ではデューティレシオの変化によって安定化点が変わるために低下し, しかもばらつきを生じた。従って, 実際のコヒーレント光通信に最も重要である発振周波数に揺らぎのない光源を得ることはできない。しかし, PEAK方式では無変調の時より安定度が向上し, しかもデューティレシオが変化しても安定度は変化しなかった。また, このとき変調パルス信号を変形させることにより, 良好なFSKが実現できた。そのことは, スペクトル線の観測において, 二つの周波数成分が明確に分離されていることで確認した。

以上のことから, ランダムな信号を送信する際にも, PDM-FSKとPEAK方式を併用することで, 半導体レーザの直接FSK変調時における周波数の安定化が可能であることがわかった。今回は波長780nm帯の半導体レーザを用いた。波長1.56 μ mの通信用の半導体レーザの場合, その2次高調波を用いることでRb原子の吸収線を基準周波数として用いることは可能となる⁽¹⁸⁾。従って, 今回提案した方法でコヒーレント光通信の送信システムの

構築が可能である。

今後は、更に高い安定度を得るため、これまで検討してきている飽和吸収分光光学系を用いた安定化^{(10)・(16)}や制御系の条件の追及を行う。また、光通信システムでの実用化に近付けるため、より高い変調周波数並びにより一般的な疑似ランダム信号などを用いた安定化を行いたい。

なお本研究の一部は文部省科研費と機械工業振興助成財団の助成のもと行われた。

(平成6年6月27日受付)

文 献

- (1) C. Nielsen and G. Jacobsen: "Frequency Stabilization of Singlemode Semiconductor Lasers at 830 nm and 1.3 μ m", J. Opt. Commun., **4**, 4, 122~125 (1983-4).
- (2) H. Tsuchida and Y. Mitsuhashi: "Frequency Stabilisation of a Modulated Semiconductor Laser", Electron. Lett., **23**, 21, 1147~1148 (1987-10).
- (3) Y. C. Chung, R. W. Tkach and A. R. Chraplyvy: "Performance of a Frequency-Locked 1.3 μ m DFB Laser under 50Mbit/s FSK Modulation", Electron. Lett., **24**, 18, 1159~1160 (1988-9).
- (4) S. Saito, O. Nilsson and Y. Yamamoto: "Oscillation Center Frequency Tuning, Quantum FM Noise, and Direct Frequency Modulation Characteristics in External Grating Loaded Semiconductor Lasers", IEEE J. Quantum Electron., **QE-18**, 6, 961~970 (1982-6).
- (5) H. Tsuchida, M. Ohtsu, T. Tako, N. Kuramochi and N. Oura: "Frequency Stabilization of AlGaAs Semiconductor Laser Based on the $^{85}\text{Rb}-\text{D}_2$ Line", Jpn. J. Appl. Phys., **21**, 9, L561~L563 (1982-9).
- (6) H. Hori, Y. Kitayama, M. Kitano, T. Yabuzaki and T. Ogawa: "Frequency Stabilization of GaAlAs Laser Using a Doppler-Free Spectrum of the Cs-D₂ Line", IEEE J. Quantum Electron., **QE-19**, 2, 169~175 (1983-2).
- (7) 佐藤 孝・須貝浩之・榛葉 實: 「Rb-D₂線を用いた半導体レーザの高速変調時における波長安定化」信学論, **J69-C**, 5, 600~608 (昭61-5).
- (8) 陸川 均・佐藤 孝・仲川昌宏・榛葉 實: 「Rb原子のファラデー効果を用いた半導体レーザの周波数安定化」信学論, **J74-C-I**, 5, 176~183 (平3-5).
- (9) 上野 隆・陸川 均・中澤孝男・佐藤 孝・榛葉 實: 「Rb原子吸収のファラデー効果を用いた半導体レーザの周波数安定化と発振周波数制御」信学論, **J75-C-I**, 6, 460~467 (平4-6).
- (10) 中澤孝男・中野博之・上野 隆・佐藤 孝・榛葉 實: 「磁気光学効果を用いた半導体レーザの周波数安定化と飽和吸収分光光学系」信学論, **J76-C-I**, 8, 285~293 (平5-8).
- (11) S. Koizumi, T. Sato and M. Shimba: "Frequency Stabilisation of Semiconductor Laser Using Atomic Absorption Line under Direct FSK", Electron. Lett., **24**, 1, 13~14 (1988-1).
- (12) 佐藤 孝・小泉春吾・斎藤敏紀・榛葉 實: 「半導体レーザの変調時における周波数安定化」信学論, **J71-C**, 10, 1450~1457 (昭63-10).
- (13) 斎藤敏紀・佐藤 孝・榛葉 實: 「半導体レーザにおける周波数安定度の直接FSK変調パルス幅依存性」信学論, **J73-C-I**, 6, 462~464 (平1-6).
- (14) 二瓶靖厚・小林吉久・佐藤 孝・榛葉 實: 「PEAK方式による半導体レーザの直接変調時における周波数安定化」電学論C, **112**, 11, 697~704 (平4-11).
- (15) 小林吉久・二瓶靖厚・水本潤一・佐藤 孝・榛葉 實: 「改善された直接FSK変調によるPEAK方式を用いた半導体レーザの発振周波数安定化」電学論C, **113**, 5, 309~314 (平5-5).
- (16) T. Sato, J. Mizumoto, Y. Kobayashi, M. Ishiguro, M. Ohkawa, T. Maruyama and M. Shimba: "Frequency Stabilization of a Semiconductor Laser under Direct Frequency Shift Keying Using the Saturated Absorption Signal", Jpn. J. Appl. Phys., **33**, Pt. 1, 3B, 1608~1613 (1994-3).
- (17) D. W. Allan: "Statistics of Atomic Frequency Standards", Proc. IEEE, **54**, 2, 221~230 (1966-2).
- (18) M. Ohtsu and E. Ikegami: "Frequency Stabilisation of 1.5 μ m DFB Laser Using Internal Second Harmonic Generation and Atomic ^{87}Rb Line", Electron. Lett., **25**, 1, 22~23 (1989-1).

佐藤 孝 (正員) 1983年京都大学大学院工学研究科博士課程電子工学専攻修了。新潟大学工学部助手を経て、1986年同助教授、現在に至る。レーザによる粒子生成、半導体レーザの周波数安定化の研究に従事。電子情報通信学会、日本物理学会、応用物理学会、レーザー学会、IEEE各会員。工博。

石黒 誠 (非会員) 1993年新潟大学工学部電気電子工学科卒業。現在、同大学大学院工学研究科電気電子工学専攻在学中。半導体レーザの周波数安定化の研究に従事。

水本 潤一（非会員） 1994年新潟大学大学院工学研究科修士課程電気工学専攻修了。同年、株式会社東芝EMIに入社。在学中、半導体レーザの周波数安定化の研究に従事。

丸山 武男（正員） 1965年新潟大学工学部電気工学科卒業。同年、新潟大学工学部助手。1989年新潟大学工学部教授、現在に至る。プラズマ物理、放電現象の基礎、固体物性の研究に従事。電子情報通信学会、日本物理学会各会員。工博。

渡部 博道（非会員） 1994年新潟大学工学部電気電子工学科卒業。現在、同大学大学院工学研究科電気電子工学専攻在学中。半導体レーザの周波数安定化の研究に従事。

榛葉 實（正員） 1955年早稲田大学理工学部電気通信学科卒業。同年電電公社電気通信研究所入所。1983年新潟大学工学部教授。1992年東京電機大学工学部教授。ミリ波導波管伝送、準ミリ波アンテナ・伝搬および光伝送の研究に従事。電子情報通信学会、IEEE各会員。工博。

大河 正志（非会員） 1989年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻電気工学分野博士課程修了。光集積回路、光計測の研究に従事。同年、新潟大学工学部助手。光情報処理の研究に従事。1993年同講師、現在に至る。応用物理学会、レーザー学会各会員。工博。