

平成22年4月13日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19360154

研究課題名（和文） GHz帯縦振動を観測可能な2次元レーザープローブの開発

研究課題名（英文） Two Dimensional Laser Probe for detection of Longitudinal Wave Vibration in GHz Range

研究代表者

橋本 研也 (Ken-ya Hashimoto)

千葉大学大学院工学研究科・教授

研究者番号：90134353

研究成果の概要（和文）：本研究では、サニャック干渉計を利用して、GHz帯微小縦振動用超高速2次元計測システムを構築した。また、試料表面の傾きや凹凸により焦点ボケに対する対応法を開発した。そして、100倍のレンズを用いて2GHz帯の薄膜バルク波共振子(FBAR)を観測し、本手法の有効性を実証した。さらに、本装置の測定結果に波数空間解析を適用し、FBAR素子における音響的損失発生機構を解明し、本装置の有効性を実証した。

研究成果の概要（英文）： The authors developed a phase-sensitive and fast-scanning laser probing system for the diagnosis of radio frequency (RF) bulk acoustic wave (BAW) devices. The system is based on the Sagnac interferometer, which is insensitive to low frequency vibration. We also developed a new auto-focusing system for solving the defocusing problem arisen when the specimen surface is uneven and/or canted and a high magnification lens is employed. It was demonstrated that high quality two-dimensional (2D) image of vibration field patterns can be captured in minutes order for RF BAW devices operating in 2GHz range with 100x lens. The wavenumber domain analysis was also applied for the measurement data, and it was revealed how and where the energy leakage occurs in the device under concern.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2008年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2009年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度			
年度			
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：

- (1) 弾性表面波 (2) レーザープローブ (3) サニャック干渉計
 (4) 縦振動 (5) バルク弾性波

1. 研究開始当初の背景

現在の移動体通信機器では、高い周波数選択性を持ち、かつ小型で・低損失な弾性表面波(Surface Acoustic Wave: SAW)素子が多用されている。これまで、多くの実験や計算機シミュレーションを駆使して最適素子構造を探索して来た。理論限界に近い性能実現が要求される現在では、より一層の性能向上の手がかりを探索するために、素子の動作と直結した弾性波の伝搬姿態を観測する手段が渴望されている。

このような観点から、本申請者らはナイフエッジ法を利用して、高周波帯での微小なたわみ振動を高感度で、2次元的に超高速測定する装置を開発してきた。この装置は、弾性波の振幅と同時に位相も測定可能であり、位置分解能も高い。また、波数空間解析等のデータ分析により、波動の様々な情報を選択的に抽出可能である。このため、様々な企業・研究機関からの利用依頼を受ける等、SAW素子用診断ツールとして高い評価を受けていた。

ただし、この手法では縦振動が検出できず、薄膜バルク波共振子(Film Bulk Acoustic Resonator: FBAR)に代表される高周波微小電子機械システム(Radio-Frequency Micro-Electro-Mechanical System: RF MEMS)の振動可視化に対応できない。このため、上記の装置の特長を保ちながら微小な縦振動を2次元的に超高速測定する装置の開発が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、これまで本申請者らが開発してきた SAW素子用2次元たわみ振動計測装置を基に、GHz帯微小縦振動を超高速に2次元計測するシステムの実現を目指した。具体的には、光学的検出手法として、これまでの装置で利用していたナイフエッジ法に代わりサニャック干渉計の適用を試み、GHz帯でも高感度に縦振動が観測可能なことを示すと共に、この干渉計が低周波振動に鈍感なために高速2次元走査が可能であることを実証することを目的とした。また、サニャック干渉計の場合には複数の干渉信号を取り出すことが可能なことに着目し、それらの利用によりレーザ出力や表面反射係数変動の影響を校正し、振動の絶対振幅を計測する手法の実現を目指した。そして、これらの機能を上記の観測装置への組み込むと共に、徹底的な計測の高速化並びに検出感度の向上と低雑音化を追求し、最終目標である産業界から要請が強い弾性波素子やMEMS素子用縦振動高感度・超高速2次元計測システムの実現を目

指した。

3. 研究の方法

本研究を通じて開発した装置の概要を以下に説明する。

3.1 光学系 図1にサニャック干渉計を利用した弾性振動観測の原理を示す。レーザダイオード(LD, $\lambda_0=660\text{ nm}$, $P_{\text{max}}=120\text{ mW}$)から出射された光は、ビーム整形後、無偏光ビームスプリッタ(NPBS)を経て、偏光ビームスプリッタ(PBS)1によりp偏光とs偏光に分離される。これらをビームAとBとする。ビームBは鏡での反射を経由してPBS2に入射し、直進してきたビームAと合波される。以下、ビームAB間の遅延時間差を Δ_t とする。PBS2を出射した両ビームは試料表面を照射し、反射を経て、再びPBS2に入射する。それまでに、 $\lambda/4$ 板1を2度通過するため、ビームAはs偏光に変わり、鏡での反射を経由してPBS1に入射し、ビームBはp偏光に変わり、直進してPBS1に入射し、合波される。即ち、ビームAとBは同一経路を反時計周りと時計周りに周回して、 $\lambda/4$ 板2とPBS3から構成される受信系に入射する。

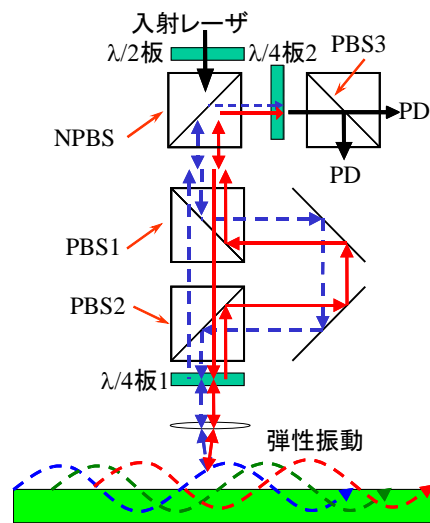


図1 サニャック干渉計による振動検出
実線:ビームAの光路、破線:ビームBの光路

反射面が静止している場合、ビームAB間に位相差が無いが、周波数 f_{RF} で表面が振動している場合、反射面に到着する時間差のために、ビームAB間に位相差 Δ_ϕ が生じる。この Δ_ϕ は、レーザ波長を λ_0 とすれば、

$$\Delta_\phi = 4\pi\lambda_0^{-1}A_{\text{RF}}\sin(\pi f_{\text{RF}}\Delta_t)\cos(2\pi f_{\text{RF}}t) \quad (1)$$

と表現できる。ここで、 A_{RF} は表面振動の振幅であり、 λ_0 より十分小さいので、光出力は Δ_0 に比例するように設定できる。また、式(1)より、 Δ_r を $(2f_{RF})^{-1}$ に設定すれば、 $f \ll f_{RF}$ での感度を最大にできる事が判る。さらに、 Δ_r を小さく設定した場合、低周波の振動には位相差が鈍感なことが判る。

以上の原理より、マイケルソン干渉計同様に基板厚さ方向の振動成分のみを選択的に観測するが、光路差長を適当に選ぶことにより、高周波振動のみが観測され、低周波振動に影響を受けなくできる。

なお、 $\lambda/4$ 板3とPBS3により、ビームA B間に 90° の位相差を与えて加算しており、これにより、干渉波形から振動の振幅ばかりでなく、位相も検出できる。

また、受光部では、高速PDとしてNewport社のAD-200を利用しており、2.5 GHz程度までの弾性振動を高感度に検出可能となっている。このAD-200は光ファイバを用いて被測定デバイスを含む光学系から空間的に離して配置できる。これは、両者間の信号の漏れを抑圧するのに極めて有効である。

3.2 高速走査機構 これに併せて、高位置確度を保ったまま、高速走査する手法を確立した。図2にその概要を示す。即ち、X-YステージはX方向に始点から終点まで自由走行する。その最中、40 nm 移動するごとに、ステージに内臓されたリニアスケールからパルス信号が出力される。この信号は分周回路へと入力され、任意の比率で分周された後、データロガーへトリガ信号として出力される。データロガーは、トリガに同期して直交検波器出力(振幅+位相)を標準化して収納する。

この方式では、分周を加えなくとも、X-Y

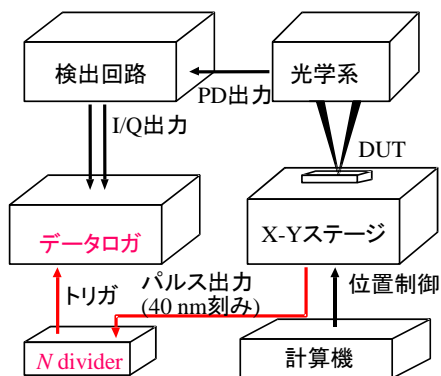


図2 高速走査機構の概要

ステージを常に最高速度(1 mm/s)で移動させながら測定できる。しかし、広範囲の測定ではデータ量が極端に多くなってしま

で、例えば分周比を25として1 μm ごとに標準化を行っている。これにより、X軸走査一回に要する時間は1秒程度、1,000 S/sもの高速データ取り込みが可能となった。

3.3 ヘテロダイン受信機 高速走査のためには、低雑音で広帯域な受信機が必要である。そのため、図3の回路構成のヘテロダイン検出器を構築した。高周波信号 f_{RF} は方向性結合器(10:1)で2つの経路に分けられ、一つは光学系を経て低雑音増幅器(LNA)で増幅された後に局部発振 f_{LO} と混合され、中間周波数 $f_{IF}=10.7$ MHzで濾波された後、同期検波器に入力する。もう一方の信号は光学系を経由せずに混合され、同期検波用の参照信号となる。なお、同期検波器としてRFロックインアンプ(Stanford Research社SR844)を利用し、IFフィルタにはセラミックフィルタを利用した。

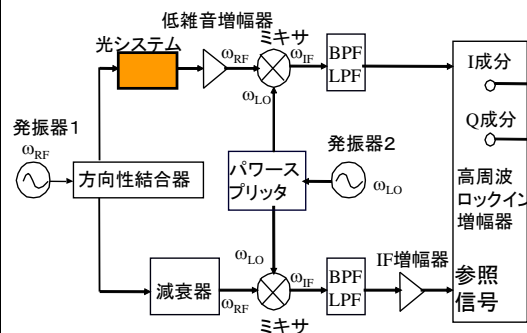


図3 ヘテロダイン検出回路の構成

3.4 試料の傾き補正 上記の光学系は、観察系と照射系が共に焦点を結ぶ共焦点光学系である。このため、同じ対物レンズで高い空間分解能が得られるが、焦点深度が浅くなるため、焦点ボケに対して非常に敏感になる。このことは、高空間分解能が必要で、高倍率の対物レンズの利用が必須な高周波デバイスの観察の際に大きな問題となる。

そこで、以下の様な傾き補正システムを新たに開発した。即ち、被測定試料は平板状であり、その傾きが焦点ボケの主因である。また、上述の装置ではリニアスケール出力より観測点の位置座標が高精度に求まる。このため、最初に試料表面の傾きを計測し、そのデータを元に、観測点の位置座標に合わせて対物レンズを上下させる機能を付加した。

また、試料表面の凹凸が大きい場合については、以下の焦点調整法を提案し、その有効性を示している。即ち、同一試料をレンズ高度を変えながら複数回走査し、その内で最も反射光強度が強いレンズ高さにおける高周波出力を選び出して全体の画像を構成する。

この手法では、試料表面の傾きの影響も同時に除去される。

4 研究成果

上述のレーザプローブを利用して、実際に多くの弾性波素子を観測し、その有効性を確認した。以下にその例を紹介する。

4.1 RF BAW 共振子の観測 図 5(a)に観測に用いた RF BAW 共振子の表面写真を示す。楕円状の部分は BAW 素子が形成されている部分で、上下の2つの長方形は電極である。図 5(b)に $|S_{11}|$ 特性を示す。1.82 GHz で共振が見られるが、その付近に多くの不要共振が観測される。なお、1.825 GHz で不要共振が遮断するが、この周波数が共振子自体の共振に相当し、ワイヤのインダタンスの影響により、共振周波数が低下している。

この装置を利用して観測した不要共振の振幅分布を図 5(c)に示す。素子の駆動周波数は 1.79 GHz、観測点数は 500-750 (X-Y)、0.4 μm ステップであり、観測時間は約 10 分である。また、光路差は 5 cm である。BAW

共振子部にエネルギーが集中しているが、分割振動している様子が見て取れる。

これにより、GHz 帯でも縦振動が観測可能で、高速 2 次元走査が可能であることを実証した。

なお、この時の表面振動の振幅は 50 pm 程度と見積もられる。

4.2 試料傾きの補正機能

図 6 に 2.5GHz 帯動作の ZnO/ダイヤモンド構造 SAW デバイスの観測結果を示す。図 6(a),(b)は PD で検出されるレーザ強度を画像化したもので、傾き補正によって画像全体に亘って焦点が合っていることが判る。なお、IDT 線幅は約 1 μm である。

図 6(c),(d)は 2.441 GHz における表面振動の観測結果である。図 6(c)では焦点ボケのために左側の一部しか SAW 振動が検出できないが、図 6(d)では画像全体で SAW 振動が検出できている。

4.3 波数空間解析 本可視化システムでは、高速測定が可能他に、振幅、位相情報を同時に入手可能といった特長がある。即ち、

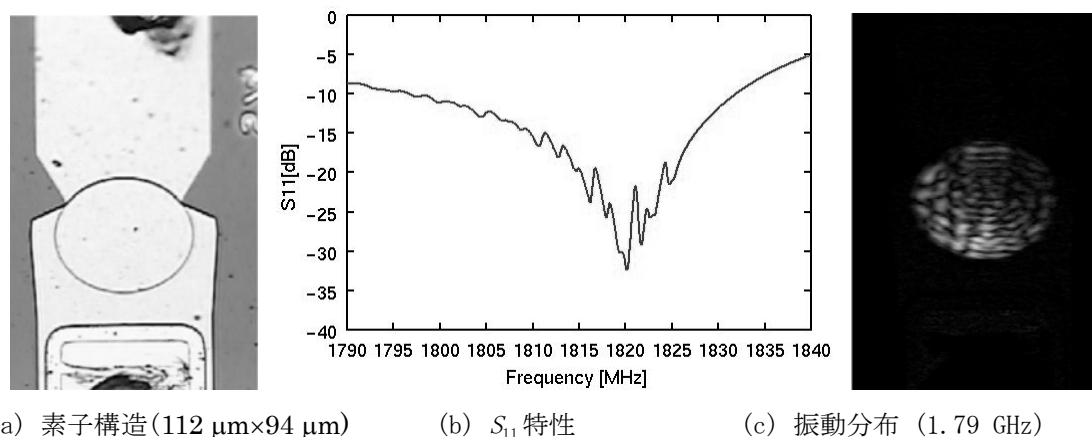


図 5 RF BAW 素子における振動分布の観測例

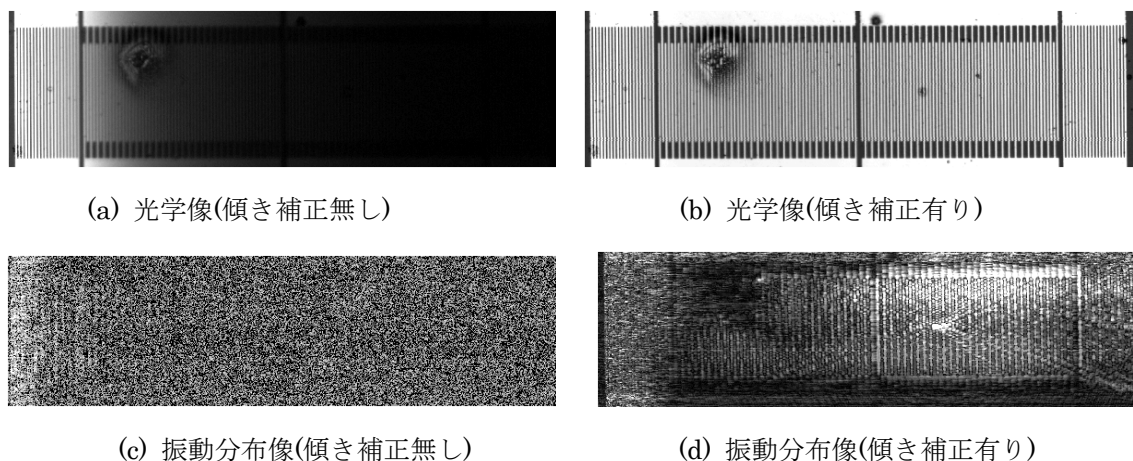


図 6 ZnO/ダイヤモンド SAW デバイスの観測結果

これらの情報を用いて、2次元フーリエ変換による波数空間解析、動画像の作成が可能であり、SAW/BAWの励振・伝搬を理解するのに有効な情報の抽出が可能である。そこで、位相を含む2次元画像に対するGUIベースの情報処理プログラムを開発した。

図5(c)に示した1.79 GHzの実空間界分布を波数空間へ展開した結果を図7に示す。図中に見られる同心円の中心が波数空間での原点に相当している。

図7において、原点付近の輝点が厚み共振を表し、その成分のみを抽出して実空間に戻すと、元の画像と殆ど同じものが復元される。

内側から2番目の円に相当する成分のみを抽出して実空間に戻したものを図8(a)に

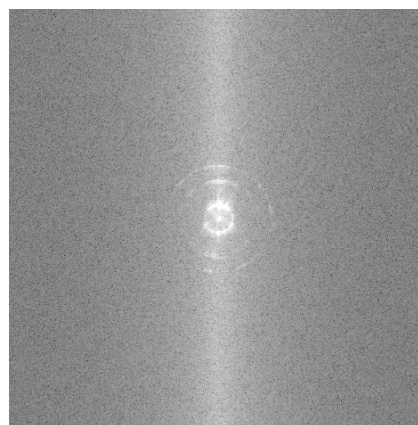
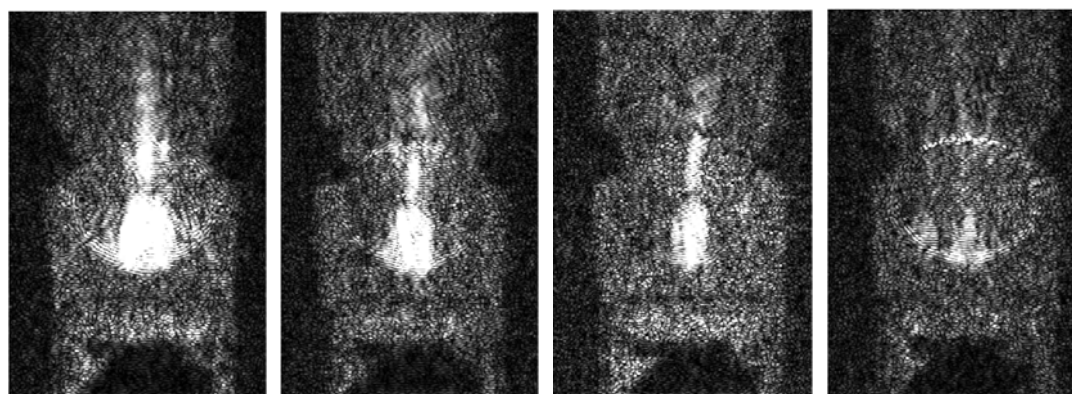


図7 波数空間上での界分布 (1.79 GHz)



(a) 1,790MHz

(b) 1,816MHz

(c) 1,820MHz

(d) 1,840MHz

図8 抽出された散乱波成分の界分布

示す。共振子端に達した厚み振動が散乱され、ラム波として伝搬していることが判る。また、周辺部へ波動が漏洩している様子も見て取れる。

図8(b)-(c)は周波数を変えた時の観測結果に対して同一の処理を与えた結果を示す。厚み振動の散乱強度は周波数によって大きく変化し、横モードの遮断周波数(1.825 GHz)以上では急激に弱くなることが判る。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計10件)

- (1) F.Thalmayr, K.Hashimoto, M.Ueda, T.Omori and M.Yamaguchi, "Quantitative Analysis of Power Leakage in an FBAR Device at the Anti-Resonance Frequency," Jpn. J. Appl. Phys., **49**, 7 (2010) [to be published]
- (2) N.Wu, K.Hashimoto, T.Omori, and M.Yamaguchi, "A Multiple-Scan Focusing Method for RF BAW Device Observation by

Laser Probe System," Jpn. J. Appl. Phys., **49**, 7 (2010) [to be published]

- (3) F.Thalmayr, K.Hashimoto, T.Omori and M.Yamaguchi, "Frequency Domain Analysis of Lamb Wave Scattering and Application to Film Bulk Acoustic Wave Resonators," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., and Freq. Contr., (2010) [to be published]
- (4) Y.L.Wang, K.Hashimoto, T.Omori and M.Yamaguchi, "Change in Piezoelectric Boundary Acoustic Wave Characteristics with Overlay and Metal Grating Materials," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., and Freq. Contr., **57**, 1 (2010) pp. 16-22.
- (5) N.Wu, K.Kashiwa, K.Hashimoto, T.Omori, M.Yamaguchi and N.Kasai, "Focus Adjustment System for a Fast-Scanning and Phase-Sensitive Laser Probe for Radio Frequency Surface and Bulk Acoustic Wave Devices," Jpn. J. Appl. Phys., **48**, 10 (2009) 108002
- (6) [Invited] K.Hashimoto, N.Wu, K.Kashiwa, T.Omori and M.Yamaguchi, "Phase-

- Sensitive and Fast-Scanning Laser Probe System for RF SAW/BAW Devices”, Proc. IUTAM Symposium of Acoustic Waves in Solids, (2009) [to be published]
- (7) N.Wu, K.Hashimoto, K.Kashiwa, T.Omori and M.Yamaguchi, “Integrated Software for Image Processing in Radio Frequency Surface and Bulk Acoustic Waves Laser Probe System”, Jpn. J. Appl. Phys., **48**, 8 (2009) 088002
- (8) N.Wu, K.Hashimoto, K.Kashiwa, T.Omori and M.Yamaguchi, “Study on the Frequency Dependence of Lateral Energy Leakage in RF BAW Device by Fast-Scanning Laser Probe System”, Jpn. J. Appl. Phys., **48**, 7 (2009) 07GG01
- (9) K.Kashiwa, T.Omori, K.Hashimoto and M.Yamaguchi, “Improvement of Detection System for a Fast-Scanning and Phase-Sensitive Laser Probe for Surface Acoustic Wave Devices in 2 GHz Range”, Jpn. J. Appl. Phys., **47**, 5B (2008) pp. 4108-4110.
- (10) K.Hashimoto, H.Kamizuma, M.Watanabe, T.Omori and M.Yamaguchi, “Wavenumber Domain Analysis of Two-Dimensional SAW Images Captured by Phase-Sensitive Laser Probe System”, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., and Freq. Contr., **53**, 5 (2007) pp. 1072-1075.

[学会発表] (計 25 件)

- (1) [招待講演] F.Thalmayr, K.Hashimoto, T.Omori and M.Yamaguchi, “Frequency Domain Analysis of Lamb Wave Scattering and Application to Film Bulk Acoustic Wave Resonators,” Proc. Fourth Int’l Symp. on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Comm. Systems (2010.3.4, Chiba, Japan) pp. 109-114.
- (2) [招待講演] N.Wu, K.Hashimoto, K.Kashiwa, T.Omori, and M.Yamaguchi, “Recent Progress in Phase-Sensitive and Fast-Scanning Laser Probe System for RF SAW/BAW Devices”, Proc. Fourth Int’l Symp. on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Comm. Systems (2010.3.3, Chiba, Japan) pp. 21-27.
- (3) T.Omori, K.Kashiwa, K.Hashimoto and M.Yamaguchi, “Time-Delay Compensation in Detection Electronics of Fast Scanning 2D SAW/BAW Laser Probe”, Proc. IEEE Ultrasonics Symposium (2009.9.21, Rome, Italy) pp. 1644-1647.
- (4) N.Wu, K.Hashimoto, T.Omori, and M.Yamaguchi, “A Multiple-Scan Focusing Method for RF BAW Device Observation by

Laser Probe System”, Proc. IEEE Ultrasonics Symposium (2009.9.20, Rome, Italy) pp.1648-1651.

- (5) N.Wu, K.Kashiwa, K.Hashimoto, T.Omori, M.Yamaguchi and N.Kasai, “Focus Adjustment System for a Fast-Scanning and Phase-Sensitive Laser Probe for Radio Frequency Surface and Bulk Acoustic Wave Devices,” Proc. IEEE Frequency Control Symposium (2009.4.23, Besancon, France) pp.915-918.
- (6) N.Wu, K.Hashimoto, K.Kashiwa, T.Omori and M.Yamaguchi, “Study on the Frequency Dependence of Lateral Energy Leakage in RF BAW Device by Fast-Scanning Laser Probe System”, Proc. IEEE Ultrasonics Symposium (2008.11.4, Beijing, China) pp.94-97.
- (7) K.Hashimoto, K.Kashiwa, T.Omori, M.Yamaguchi, O.Takano, S.Meguro and K.Akahane, “A Fast Scanning Laser Probe Based on Sagnac Interferometer for RF Surface and Bulk Acoustic Wave Devices”, Technical Digest, IEEE Microwave Symposium (2008.6.18, Atlanta, Georgia, USA) pp.851-854.
- (8) N.Wu, K.Hashimoto, K.Kashiwa, T.Omori, and M.Yamaguchi, “Integrated Software for Image Processing in RF SAW/BAW Laser Probe System”, Proc. IEEE Frequency Control Symposium (2008.5.20, Honolulu, Hawaii, USA) pp.778-782.

6. 研究組織

(1)研究代表者

橋本研也 (Ken-ya Hashimoto)
 千葉大学大学院工学研究科
 教授
 研究者番号：90134353

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

山口正恆 (Masatsune Yamaguchi)
 千葉大学大学院工学研究科
 教授
 研究者番号：00009664

大森達也 (Tatsuya Omori)
 千葉大学大学院工学研究科
 助教
 研究者番号：00302527