山本量子ゆらぎプロジェクトの研究成果

目次

1.　田中：スクイド光発生用半導体レーザー・・・・・・・・・・・・・・・・・　2

2.　井上：サブショットノイズ光干渉計・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　3

3.　カサピ：サブショット雑音 FM 分光・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4

4.　タッソーネ：微小共振器内励起子のポラリトンへの誘導散乱・・・・・・　6

5.　リュウ：電子のフェルミオン量子干渉・・・・・・・・・・・・・・・・・　8

6.　キム：単一光子ターンスタイル素子・・・・・・・・・・・・・・・・・・　１０

7.　蒋：高感度 AC バランス形ホモダイン検出・・・・・・・・・・・・・・・　１２

8.　陳：表面第 2 高調波の振幅と位相の高感度同時測定・・・・・・・・・・　１４

9.　山口：単一原子接合におけるクーロンブロッケード振動・・・・・・・・　１６

1.　スクイズド光発生用半導体レーザー

スクイズド光を安定に発生する低閾値･高効率の TJS レーザーを開発し、ショット雑音以下 -5dB のスクイズドレベルを確認した。

研究成果の概要

1）上部クラッド層の成長時に V/III 比を大きくすることで、キャリア濃度一定のまま Si 濃度を低減し、熱処理中の混晶化を抑制することに成功した。その結果、低閾値、高効率化を実現した。

2）半導体レーザーと検出器を直接結合させる face-to-face 振幅雑音測定にて、ショット雑音雑音以下-5dB のスクイズドレベルを直接検波することができた。

成果の展開可能なシーズ、用途等

1）重力波検出。

2) FM 分光計測特許出願。

特許出願

なし

報告書他

1) S.Lathi, and K.Tanaka, T.Morita, H.Kan, and Y.Yamamoto
Transverse-junction-stripe GaAs/AlGaAs lasers for squeezed light generation
Submitted to IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998

〔研究者名〕田中 和典、森田 剛徳、町田 進、菅 博文

2.　サブショットノイズ光干渉計

振幅スクイズド光を用いたサブショットノイズ光干渉計を提案し、その動作原理を確認した。

研究成果の概要

1）ダークフリンジ干渉計の入力ビームスプリッターのオープンポートに振幅スクイズド光を入射することにより、サブショットノイズ干渉計が実現できることを理論的に示した。

2）定電流動作の半導体レーザーにより発生された振幅スクイズド光を用いて光干渉計の出力光がサブショットノイズであることを実験的に検証した。

3）振幅スクイズド光を用いた重力波検出用光干渉計を提案した。（図 1、図 2）

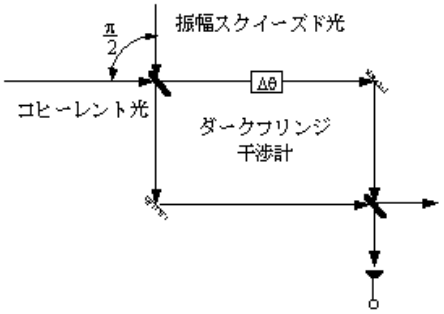

図 1：サブショットノイズ光干渉計

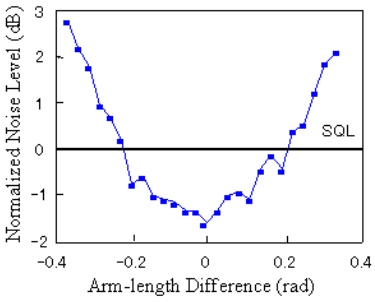

図 2：干渉計出力光の強度雑音

成果展開可能なシーズ、用途等

1）重力波検出用光干渉計。

特許出願

1) Sub-Poissonian Interference Measurements
（サブポアソン干渉計測装置及びその方法）

特　　許：08/436,579(平成 7 年 5 月 8 日),US

出　願　人：科学技術振興事業団、スタンフォード大学

請求の概要：半導体レーザーによって発生された振幅スクイズド光をダークフリンジ干渉計の入力ビームスプリッターのオープンポートに入射することにより、量子限界を超えた位相の測定が行なえる。

報告書他

1）S.Inoue, G.Bjork, and Y.Yamamoto. “Sub-Shot-Noise Interferometry with Amplitude Squeezed Light from a Semiconductor Laser”, in Proceedings of the SPIE Conference on Laser Frequency Stabilization and Noise Reduction, 2378, 99-106(1995).

2) S.Inoue and Y.Yamamoto. Longitudinal Mode-Partition Noise in a Semiconductor Laser Based Interferometer. Opt.Lett. 22, 328-330(1997).

3）S.Inoue and Y.Yamamoto. Gravitational Wave Detection using Dual Input Michelson Interferometer. Phys.Lett. A236, 183-187(1997).

〔研究者名〕井上　修一郎、グンナー・ビョルク

3.　サブショット雑音 FM 分光

振幅スクイズド状態で発振する半導体レーザーの出力光を用いたショット雑音限界以下の FM 分光方法

研究成果の概要

振幅スクイズド状態で発振する半導体レーザーの出力光を用いて、原子の FM 分光をショット雑音限界以下で行なった。これは半導体レーザーを用いた非古典的な分光の最初の実験結果である。この実験結果は半導体レーザーの注入電流を変調して残留 AM 変調成分を含まない理想的な FM 変調の出力光が得られるという新しい方法である。さらに、半導体レーザーを用いた多くの超低雑音測定に対して有効な方法になる。

また、半導体レーザーの出力光の位相雑音を用いる分光方法に振幅スクイズド状態を用いるという新しい方法が可能になる。振幅スクイズド状態は半導体レーザーの出力光が持つ信号光と雑音による SN 比を改善することができる。(図 1、図 2)

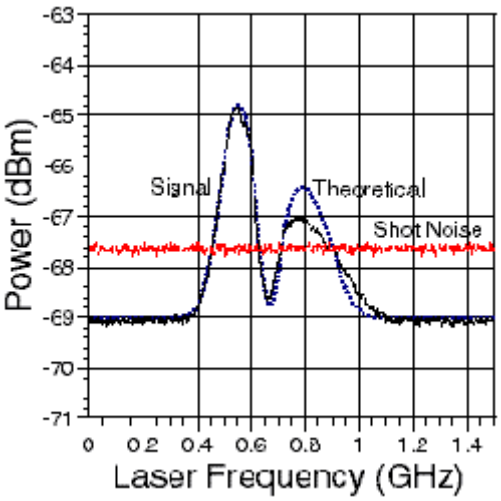

図 1：振幅スクイズド状態半導体レーザーを用いた周波数変調光源による FM 分光。赤のトレースは実験に用いた光量に対するショット雑音レベル、点線(青)は実験に用いた光量と FM 変調指数よりもとめた FM-AM 変換信号の理論値を示す。実線は FM-AM 変換信号の実験値である。吸収損失を補正した振幅スクィージングレベルはショット雑音レベルより約 2dB 低くなっている。

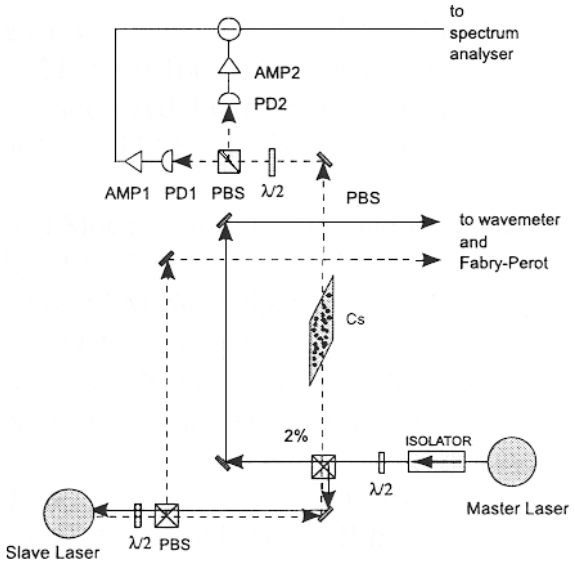

図 2：半導体レーザーを用いたサブショット雑音 FM 分光の実験系。スレーブレーザーは外部共振器とグレーティングによるフィードバックを行なった FM 変調されたマスターレーザーによって注入同期状態にある。スレーブレーザーの出力光はマスターレーザーの FM 変調成分を保存し、AM 変調成分を抑圧する。

スクイズド状態で周波数可変なスレーブレーザーの出力光を用いてルビジューム蒸気のドップラーフリーの FM 分光を行なう。プローブ光はバランス形のホモダイン検波によって FM-AM 変換信号とショット雑音を同時に測定する。

成果展開可能なシーズ、用途等

1）この実験系は半導体レーザーと一般の光学部品で構成でき、他のスクィージングの発生法に比べて、非常に安価で、広い応用が期待できる。

2）この技術は大気中、製造工程、生物系サンプルの分光等におけるチリの測定と高出力レーザー光を用いないと必要な SN 比が達成できない多くの測定技術に応用が可能である。

3）より大きなスクィージングを発生する半導体レーザーの開発により、測定における SN 比の改善が直接可能である。

出願特許

なし

報告書他

1）S.Lathi, S.Kasapi, and Y.Yamamoto. Phase Sensitive Frequency-Modulation Noise Spectroscopy with a Diode Laser. Optics Letters 21, 1600-1602(October 1996).

2）S.Kasapi, S.Lathi, and Y.Yamamoto. Amplitude-Squeezed, Frequency-Modulated, Tunable, Diode-Laser-Based Source for Sub-Shot-Noise FM Spectroscopy. Optics Letters 22, 478-480(April 1997).

3）S.Inoue, S.Lathi, and Y.Yamamoto. Longitudinal Mode-Partition Noise and Amplitude Squeezing in Semiconductor Lasers. JOSA B14, 2761-2766(November 1997).

4）S.Kasapi, S.Lathi, and Y.Yamamoto. Sub-shot-noise FM Noise Spectroscopy of Trapped Rubidium Atoms. JOSA B15, 2626-2630(October 1998).

5）S.Lathi and Y.Yamamoto. “Effect of Nonlinear Gain and Nonlinear Loss on the Intensity Noise of Multimode Semiconductor Lasers”. to be published in Phys.Rev.A(January 1999).

6）S.Lathi, S.Inoue, Y.Yamamoto, K.Tanaka, H.Kan. “ Transverse-Junction-Stripe GaAs/AlGaAs. Lasers for Squeezed Light Generation”. to be published in IEEE J. of Quantum Electronics (March 1999).

〔研究者名〕スティーブン・カサピ、シーマ・ラティ

4.　微小共振器内励起子のポラリトンへの誘導散乱

共振器間隔が励振波長の半分の間隔である半導体量子井戸微小共振器において、光励起により生成された励起子が共振器の光モードと結合したポラリトンがボーズ粒子としてコヒーレント発振するボーザーを提案し、その誘導放出現象を波長域ならびに時間領域で確認。

研究の概要

我々は、励起子のコヒーレント･ボーズ発振を目指し、半導体量子井戸内部に波数空間で低分散励起子を発生させ、それを共振器の光モードと結合させた結果生じる上と下のポライトンへの散乱を用いたコヒーレント散乱動作を提案した。このようなボーズ粒子の誘導散乱現象を観測するために、我々はまず始めに、下のポラリトンモードを励起し、それが上のポラリトンモードに散乱された結果生ずる上のポラリトンの蛍光を観測した。本実験では、ガリウム･ヒ素とアルミ･ガリウム･ヒ素の半導体共振器にガリウムヒ素の量子井戸活性層を設けた試料を用いた。いったん単色レーザーにより励起子を発生させ、もうひとつの単色レーザーにより下のポラリトンを注入する。その際、得られる上のポラリトンモードからの蛍光を観測する。この結果、上のポラリトンの蛍光強度が、入射する下のポラリトンモードの強度に比例して増強される誘導発光現象を観測することに成功した。我々はすぐさま、その実験結果をレート方程式からなる古典的なモデル計算と比較して、よい一致が見られることを解明した。(図 1、図 2)

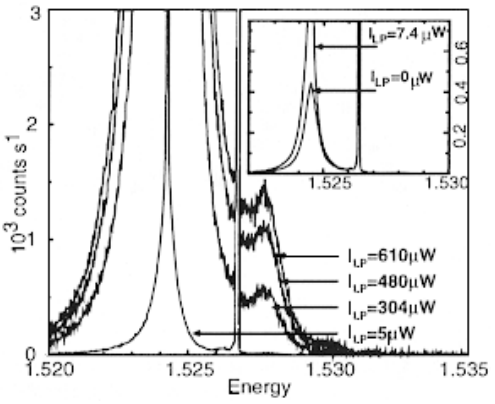

図 1：上と下のポラリトンモード蛍光スペクトル。上のポラリトンモードからの発光の誘導放射による増強が観測される。

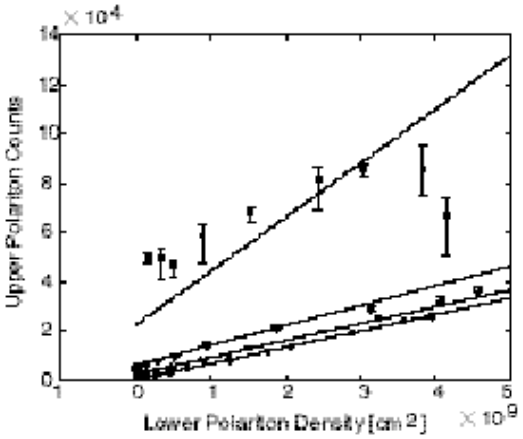

図 2：さまざまな励起子密度における、上のポラリトンモードの波長積分蛍光強度の、下のポラリトン強度に対する関数。(点:実験値、線:理論)

成果の展開可能なシーズ、用途など

1）レーザーと同様なボーズ粒子のコヒーレント発振。

特許出願

なし

報告書他

1) R.Huang, H.Cao, and Y.Yamamoto. Phys.Rev.B, 56, 15, 9217-9220(1997).

2) R.Huang, F.Tassone, and Y.Yamamoto. to appear in Microelectronic ENGINEERING (1999).

3) R.Huang, F.Tassone, and Y.Yamamoto. to appear in SPIE Proc.Ultrafast Phenomena in Semiconductors III (1999).

〔研究者名〕フランチェスコ・タッソーネ、ロビン・ホワン、グレッブ・クリモヴィッチ

5.　電子のフェルミオン量子干渉

電子はフェルミ粒子として、2 つの粒子は同一の状態を占めることができないというパウリの排他率に従うと考えられている。これを半導体メゾスコピック干渉計構造内部における電子の散乱の雑音特性を解明することで実験的に証明。

研究成果の概要

ボーズ粒子である同一のコヒーレンス状態にある光子を 1 枚の半透明鏡において衝突させた場合、一方の出力ポートに同時に 2 つの光子を観測する確率(強めあい)、そして他方のポートからはなんの出力も得られない確率(弱めあい)が高くなる。これは光子のボーズ統計性による。これに対し、電子では、フェルミ粒子の特性として、それぞれのポートに同時に観測される可能性が高い。これは、衝突の状態でも、ふたつの電子が同一の状態をとりえないという排他率によっている。しかしながら、これを実験的に観測した例はこれまでになかった。本実験では、半導体プロセスにより微小電子干渉計構造を作製し、これを数ミリ･ケルビンでの極低温において電子の干渉を起こさせ、両方から電子が入射する場合と片方のみから電子が入射する場合の出力電流ゆらぎの抑圧を観測することで、世界に先駆けて証明に成功した。(図 1、図 2)

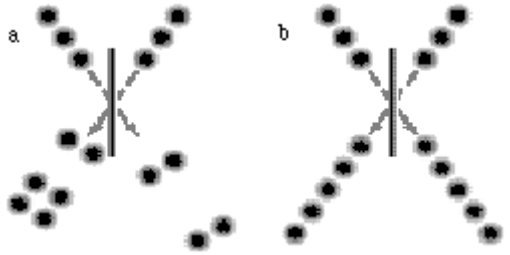

図 1：(a) 同一のコヒーレント状態にある光子の理想的な干渉によるスーパーポアソン的な出力光子ゆらぎ。(b)非対称波動関数状態にある 2 つの電子の理想的な干渉により、それぞれの出力ポートの電流ゆらぎは抑圧される。

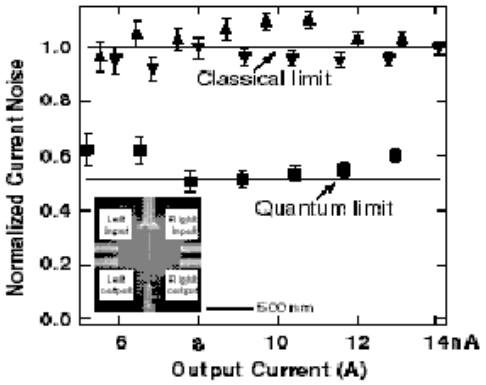

図 2：入射電流強度を関数とした電子干渉計の右のポートから得られる電流の規格化雑音強度。入射ポートのいずれかのみに電子を入射した場合(三角の上向きと下向き)は分岐雑音が観測される。これに対し、本実験では、四角で与えられたように、電流雑音が量子限界に達し、フェルミ統計の特徴を示した。素子の理想状態からのずれが完全なる雑音の抑圧を妨げている。
挿し絵：電子が 2 次元的に閉じ込められた薄膜ガリウムヒ素に作製された電子半透明鏡の電子顕微鏡写真。

成果の展開可能なシーズ、用途など

1) 本実験により得られた知見は、2 次のコヒーレンス関数に基づく量子統計性が重要になる電子系における雑音現象の研究には有効である。熱光源から発生する光子の統計性をハンベリー/ブラウン/ツイスらが観測したように、熱浴からの電子の非相関性を最近観測

するのに成功した。今後は、量子ホール状態などのさまざまな量子状態にある電子の「量子電子光学」とでもいうべき新たな場を与えるものと期待する。高感度交流変調バランス・ホモダイン検出法の確立。

特許出願

なし

報告書他

1) Y.Yamamoto, R.C.Liu, J.Kim and A.Imamoglu. " Quantum noisesuppression in macroscopic conductors and p-n junctions". in Research Trends in Non-linear and Quantum Optics, ed. by V.Stefan (The American Institute of Physics) (New York, American Institute of Physics, to be published).

2) R.C.Liu, Y.Yamamoto and S.Tarucha. Signs of quantum statistical effects in electron collision. Physica B 249-251, 152-6(June 1998).

3) R.C.Liu, B.Odom, Y.Yamamoto and S.Tarucha. Quantum interferencein electron collision Nature 391, 263-265(January 1998).

4) R.C.Liu, P.Eastman and Y.Yamamoto. Inhibition of elastic and inelastic scattering by the Pauli exclusion principle: Suppression mechanism for mesoscopic partition noise. Solid State Communications 102, 785-789(June 1997).

5) R.C.Liu, B.Odom, J.Kim, Y.Yamamoto and S.Tarucha. "Partition noise in mesoscopic devices: Experiments in quantum electron optics". in Proceedings of the 23rd International Conference on the Physics of Semiconductors, ed. by M.Scheffler and R.Zimmermann (World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd., New Jersey, 1996) pp.2399-2402.

6) R.C.Liu, P.Eastman and Y.Yamamoto. "Simulations of partition noise suppression". in Quantum Transport in Semiconductor Submicron Structures, ed. by B.Kramer (Kluwer Academic Publishers, the Netherlands, 1996) pp.365-374.

7) R.C.Liu and Y.Yamamoto. "Partition noise in electron transport". in Quantum Dynamics of Submicron Structures, eds. by H.A.Cerdeira, B.Kramer and G.Schon (Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1995) pp.427-442.

8) R.C.Liu and Y.Yamamoto. Conductance dependent suppression of current partition noise in mesoscopic electron branching circuits. Physica B 210, 37-412 (April 1995).

9) R.C.Liu and Y.Yamamoto. Nyquist noise in the transition from mesoscopic to macroscopic transport. Physical Review B 50, 17411-17414 (December 1994).

10) R.C.Liu and Y.Yamamoto. Suppression of quantum partition noise in mesoscopic electron branching circuits. Physical Review B 49, 10520-10532 (April 1994).

〔研究者名〕ロバート・リュウ

6.　単一光子ターンスタイル素子

クーロン･ブロッケード効果を用いて単一光子を発生するターンスタイル素子。

研究成果の概要

金属-絶縁体-金属の接合とか半導体量子ドットで発生するクーロン･ブロッケード効果を用いれば、外部からの変調周期毎に単一の電子を注入するターンスタイル素子が実現できる。この効果を半導体の p-n 接合に応用すれば、単一の電子とホールを活性層に注入して、変調周期毎に単一の光子を発生させることが可能である。このクーロン･ブロッケード効果を用いて単一の光子を発生させたターンスタイル素子の実験結果を示す。この素子に流れる電流 I は変調周波数 f に依存し、I=nef（e は電子電荷）になり、n 個の電子と n 個のホールが変調周期（n=1,2,3･･）毎に規則正しく注入されることを示す。単一光子ターンスタイル素子で発生した光子は single photon counter を用いて検出した。検出された光子数は、クーロン･ブロッケード効果によって、変調周期による光子の発生数が制限されていることを示している。（図 1、図 2）

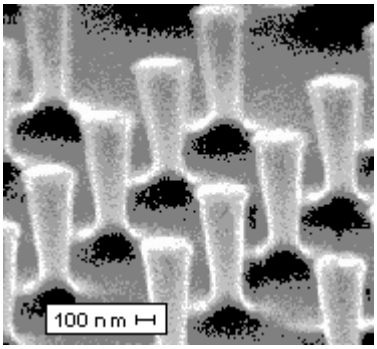

図 1：電子ビームリソグラフィーと ECR-RIE(Electoron Cyclotoron Resonance Reactiv Ion Etching)法で作製した GaAs サブマイクロンサイズの p-n 接合。

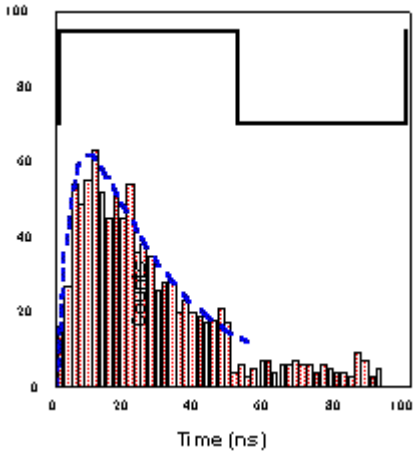

図 2：外部変調信号と関係する時刻に対する光子発生の確率分布。
光子の発生は変調信号の立ち上がり部分に集中し、パルスがオンの間、時間経過と共にその確率は減少している。これは変調周期ごとにホールの注入が制限されていることを示している。

成果展開可能なシーズ、用途等

1）電子、ホール、光子を閉じ込める量子ドットとか微小共振器構造に応用して、素子特性の改善ができる。

2）さらなる素子特性の改善ができたならば、単一光子を用いた量子暗号通信の光源に使用できる。

3）単一光子の検出器の開発は量子工学の基礎実験および量子暗号通信などの実験に役立つ。

出願特許

なし

報告書他

1) J.Kim, Y.Yamamoto, and H.H.Hogue. Noise-free avalanche multiplication in Si solid state photomultipliers. Appl.Phys.Lett. 70, 2852(1997).
2) J.Kim, H.Kan, and Y.Yamamoto. Single-photon turnstile device: simultaneous Coulomb blockade for electrons and holes Semicond.Sci.Technol. 13, A127(1998).
3) J.Kim, S.Takeuchi, Y.Yamamoto, and H.H.Hogue. "Multi-photon detection using Visible Light Photon Counter". to be published in Appl.Phys.Lett.
4) S.Takeuchi, J.Kim Y.Yamamoto, and H.H.Hogue. "Development of a High Quantum Efficiency Single Photon Counting System". to published in Appl.Phys.Lett.
5) J.Kim, O.Benson, H.Kan, and Y.Yamamoto. Single Photon Turnstile Device, to be published in Nature.

〔研究者名〕ジャンサン・キム、オリバー・ベンソン、菅 博文

7.　高感度 AC バランス形ホモダイン検出

干渉計の一方の腕の長さを交流変調したバランス･ホモダイン計測を行うことで、フェムト秒の時間分解能とフェムト･ワットの検出限界感度を達成。これを用いて、半導体微小共振器内部で起こるフェムト秒ポラリトン･コヒーレント共振を観測。

研究の成果の概要

広いダイナミックレンジの高感度交流変調バランス･ホモダイン検出法を確立した。フェムト秒チタン･サファイアレーザー（76MHz 繰り返し、パルス幅 100 フェムト秒）を用いることで、限界感度（S/N=1）は 0.25 フェムト･ワット（1.25×10-5 光子/パルス）を達成した。これを用いて、我々は分子線エピタキシー法により作製した半導体微小共振器内の励起子と共振器内光子の強い結合状態であるポラリトンのコヒーレント振動を、高い S/N にてフェムト秒の時間領域で観測するのに成功した。励起フェムト秒パルスの強度を変えることで､励起子-励起子散乱やバンド･フィリングなどによるデコーヒーレンスの影響を同様に時間領域で観測し、理論的な解析による確証を得た。さらに、我々は世界に先駆けて、微弱励起状態での励起子-ポラリトンの誘導放出現象を観測し、ボーザーの開発に一歩近づけることができた。(図 1、図 2)

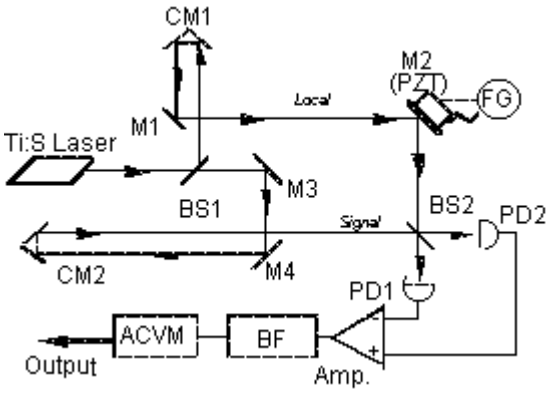

図 1：交流変調バランス･ホモダイン検出装置の基本構成。

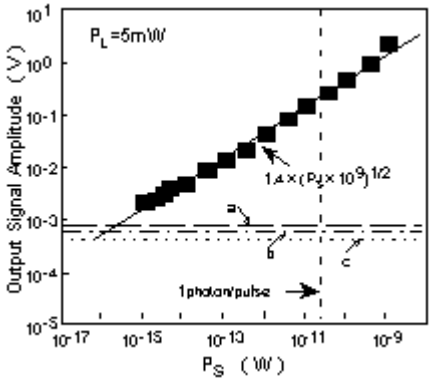

図 2：さまざまな入射信号強度における交流変調バランス･ホモダイン出力。局発光強度は 5mW。a～c の点線は、それぞれ検出された雑音レベル、局発光なしの雑音レベル、そして、理論的はショット雑音限界である。

成果の展開可能なシーズ、用途等

1）近接場光学顕微鏡と接続することによる高感度ナノ構造分光計測系の達成。

2）半導体微小共振器におけるボーザー動作の時間解析。

特許出願

1）光振幅位相特性測定装置及びその測定方法

特　　願：平 8-185235(平成 8 年 7 月 16 日)

特　　願：08/893,647(平成 9 年 7 月 11 日),US
特　　願：97112135.5(平成 9 年 7 月 16 日),EP
出　願　人：科学技術振興事業団
請求の概要：光パルスの高感度な検出方法

2）光位相特定測定装置及び測定方法
特　　願：平 9-262064(平成 9 年 9 月 26 日)
特　　願：09/160,910(平成 10 年 9 月 25 日),US
特　　願：98118233.0(平成 10 年 9 月日),EP
出　願　人：科学技術振興事業団
請求の概要：ホモダイン干渉計を用いた 2 つの基本波から発生された SHG 波と基本波との間で振幅と位相を測定する光振幅位相測定装置とその測定方法

報告書他

1）H.Cao, S.Jiang, S.Machida, Y.Takiguchi, and Y.Yamamoto. Collapse and Revival of Exciton-polariton Oscillation in a Semiconductor Microcavity. Appl.Phys.Lett. 71(11), 1461-1463 (September 1997).
2）S.Jiang, S.Machida, Y.Takiguchi, H.Cao, and Y.Yamamoto. Wide Band AC Balanced Homodyne Detection of Weak Coherent Pulses. Opt.Commun. 145, 91-94(January 1998).
3）S.Jiang, S.Machida, Y.Takiguchi, Y.Yamamoto, and H.Cao. Direct Time-domain Observation of Transition from Strong to Weak Coupling in a Semiconductor Microcavity. Appl.Phys.Lett. 73, 3031-3033 (November 1998).
4）S.Jiang, S.Machida, Y.Takiguchi, Y.Yamamoto, and H.Cao. Direct Time-domain Observation of Exciton Polariton Oscillation in a semiconductor Microcavity (submitted to Superlattices and Microstructures, 1998)

〔研究者名〕蒋 曙東、瀧口 義浩、町田 進

8.　表面第 2 高調波の振幅と位相の高感度同時測定

光ホモダイン検出法を用いて表面第 2 高調波の振幅と位相の高感度同時測定を初めて実現。

研究成果の概要

1）試料表面からの第 2 高調波を非線形光学結晶で発生させた局部発振光と干渉させて検出する光ホモダイン検出法の開発に成功。

2）基本波の干渉信号を基準信号として、第 2 高調波の干渉信号を同期検波することにより、第 2 高調波の振幅と位相の同時検出に初めて成功。検出感度は 3aW(6 フォトン/秒)に到達。

3) Si(111)表面からの表面第 2 高調波の振幅と位相の同時測定を行い、本方法の有効性を確認。

（図 1、図 2、図 3）

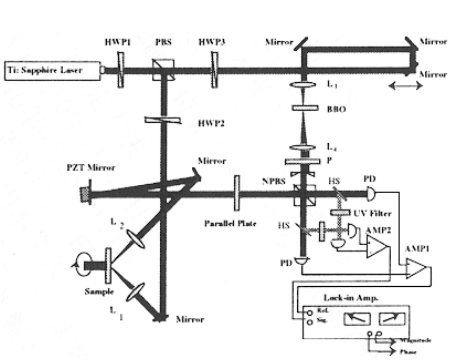

図 1：表面第 2 高調波検出系の構成図

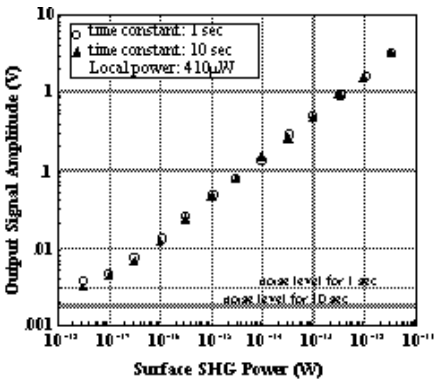

図 2：検出系の出力特性

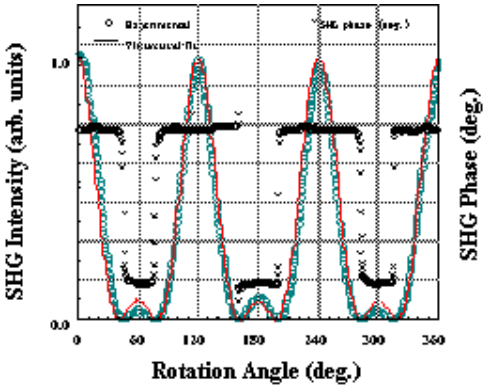

図 3：表面 SHG の振幅と位相の測定結果

成果の展開可能なシーズ、用途等

1）半導体表面の原子配列や電子状態の計測。

2）表面ダイナミックスのリアルタイム観察。

特許出願

1）光位相特定測定装置及び測定方法

特　　願：平 9-262064(平成 9 年 9 月 26 日)

：09/160,910(平成 10 年 9 月 25 日),US

：98118233.0(平成 10 年 9 月日),EP

出　願　人：科学技術振興事業団、山本　喜久

請求の概要：ホモダイン干渉計を用いた 2 つの基本波から発生された SHG 波と基本波との間で振幅と位相を測定する光振幅位相測定装置とその測定方法

2）光振幅位相特性測定装置及びその測定方法
特　　願：平 10-8919(平成 10 年 1 月 20 日)
特　　願：09/160,910(平成 10 年 9 月 25 日),US
特　　願：98118233.0(平成 10 年 9 月日),EP
出　願　人：科学技術振興事業団、山本　喜久
請求の概要：ホモダイン干渉計を用いた 2 つの基本波から発生された和もしくは差周波と基本波との間で振幅と位相を測定する光振幅位相測定装置とその測定方法

報告書他

1) J.Chen, S.Machida, and Y.Yamamoto. Simultaneous measurement of amplitude and phase in surface second-harmonic generation. Opt.Lett.Vol.23, pp.676-678(1998).
2) 陳　軍、黄　徳歓、瀧口　義浩、山本　喜久. 第 2 高調波発生(SHG)を用いたシリコン表面の研究. 第 43 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 II p-267(1996).
3) 陳　軍、黄　徳歓、瀧口　義浩、山本　喜久. 共鳴表面第 2 高調波発生(SHG)を用いたシリコン表面の研究. 第 57 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集 II p-400(1996).
4) 陳　軍、町田　進、山本　喜久. 表面第二高調波の振幅と位相の高感度同時測定. 第 22 回光波センシング研究会論文集 LST20-11、pp.77～83(1997).
5) J.Chen, S.Machida, and Y.Yamamoto. Simultaneous measurement of amplitude and phase in surface SHG. Abstracts of Fifth International Workshop on Femtosecond Technology, p142(1998).
6) 陳　軍、町田　進、山本　喜久. ホモダイン検波法による表面 SHG の偏光依存性の高感度測定. 第 45 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 III p-1025(1998).
7) J.Chen and S.Machida. Simultaneous measurement of amplitude and phase in surface SHG. Abstracts of the International Symposium on Quantum Optics and Mesoscopic Physics, p-38(1998).

〔研究者名〕陳 軍、町田 進

9.　単一原子接合におけるクーロンブロッケード振動

タングステン単結晶(111)から作成した単一原子ナノチップの電子状態および、ナノチップとサンプル表面の電気伝導特性について調べた。

研究成果の概要

ナノチップ先端の電子の局在状態を電流が流れると、電子は 1eV 程度の大きな帯電エネルギーの変化を感じ、電極から十分なエネルギーを供給されない限り、電流がながれなくなる。これは、印加電圧に対して微分コンダクタンスが 1V の周期で振動するという現象として観測される。実験は超高真空 STM で圧力 2×10^{-8}Pa、温度 77K および 300K の条件の元で行われた。単一原子ナノチップは先端がタングステン原子 1 個まで尖り、次の層にタングステン原子が 3 個、次のそうに原子が 6 個と続く。この微分コンダクタンスの振動は、初めて実験的に確かめられた単一原子接合(単一原子ナノチップとサンプル表面)でのクーロンブロッケード効果である。(図 1（a)、図 1（b))

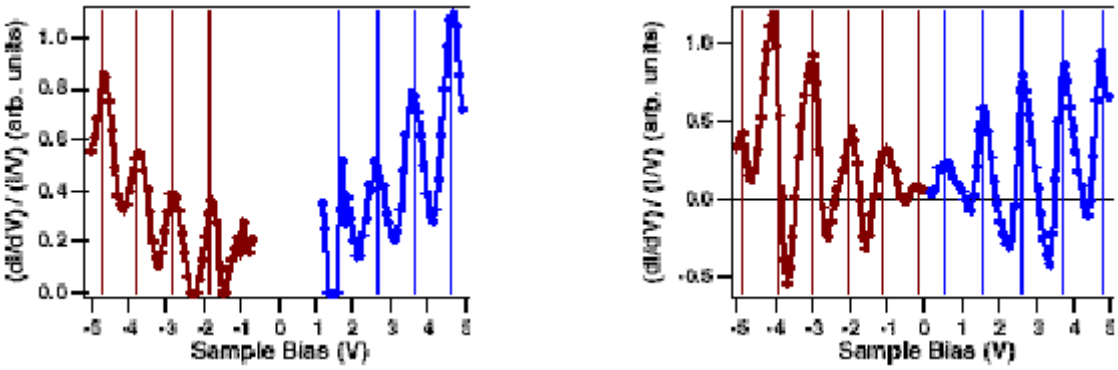

図 1：規格化微分コンダクタンス vs 単一原子ナノチップ-サンプル間印加電圧
(a)シリコン(100)2×1 再構成表面　　(b)金(111)表面

成果展開可能なシーズ、用途等

1）原子スケール単一電子デバイス。

特許出願

1）走査トンネル顕微鏡探針の作製方法及びその探針
特　　願：平 9-338894(平成 9 年 12 月 19 日)
　　：PCT/JP98/05543(平成 10 年 12 月 8 日)
出　願　人：科学技術振興事業団、山本　喜久
請求の概要：請求の概要:先端が単一原子で形成された STM 探針の作製方法

報告書他

1) F.Yamaguchi, D.H.Huang, and Y.Yamamoto. Coulomb blockade oscillation in a singleatomic junction. Semicond.Sci.Technol. 13, A124-126(1998).

2) D.H.Huang, F.Yamaguchi, and Y.Yamamoto. In situ scanning tunneling microscopy nanotip fabrication with field-enhanced surface diffusion, thermal evaporation and field emission. Jpn.J.Appl.Phys. 37, 3824-3827(1998).

3) F.Yamaguchi, D.H.Huang, Y.Yamamoto. Theory of transport through a single atomic junction. Jpn.J.Appl.Phys. 36, 3799-3803(1997).

〔研究者名〕山口 文子、黄 徳歓、張 毅