

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20612011

研究課題名(和文) コヒーレントパルステラヘルツ光による極限物性測定

研究課題名(英文) Application of the Terahertz time-domain spectroscopy to magneto-optical measurements under high magnetic field

研究代表者

今中 康貴 (IMANAKA YASUTAKA)

独立行政法人物質・材料研究機構・量子ドットセンター・主任研究員

研究者番号：70354371

研究成果の概要(和文)：

テラヘルツ領域の新規分光法として、近年様々な分野で応用が始まっているテラヘルツ時間領域分光法を、強磁場極低温下の物性研究に応用するため、周辺のシステムも含めて様々な技術開発を行った。その結果、テラヘルツ時間領域分光法による InGaAs₂ 次元電子試料のサイクロトロン共鳴の観測に成功した。また 1THz 以下のミリ波、サブミリ波領域における高電子濃度半導体 2 次元電子試料の磁気透過測定で、特異な量子振動を観測した。

研究成果の概要(英文)：

We have established the terahertz time-domain spectroscopy for applying the magneto-optical measurements in semiconductor low dimensional systems under magnetic fields. The cyclotron resonance was observed in a InGaAs two-dimensional electron system with using the developed system. As other results, we succeeded in observing anomalous quantum oscillation of the magneto-transmission for the quantum Hall systems with dense two-dimensional electron concentration at millimeter and sub-millimeter wave region.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：半導体・強磁場物性

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：テラヘルツ，光源技術，光物性，低温物性，強磁場

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ光は、可視光と電波の境界領域の周波数帯にある光の総称であり、赤外、遠赤外、サブミリ波と呼ばれる波長、周波数領域の光である。この周波数帯の光は、我々に身近な可視光やラジオ波などの電磁波に比べてその開発や利用が著しく遅れていたが、90年代より従来のテラヘルツ分光法とは異なる可視光フェムト秒レーザーを利用した

新規テラヘルツ光発生検出システムが、医療、生体や危険物のイメージング等へ向け、その開発が急速に進んできた。

一方、固体物性研究においては、半導体の重要なバンドパラメーターである有効質量や磁性体の g 因子を直接得ることができるサイクロトロン共鳴や電子スピン共鳴などの共鳴測定、また強相関物質の光学伝導度測定にテラヘルツ帯の測定は重要な役割を果

たしてきたが、光源や検出器などの制約のために測定方法にあまり大きな進展が無い状況が続いていた。

2. 研究の目的

このような状況下で、振幅と位相の同時測定が可能なテラヘルツ時間領域分光は、クラマースクロニヒ変換無しにテラヘルツ帯の光学定数が求められることや検出器に液体ヘリウムを使う必要性が無いことなど、従来法にない多くの利点があり、固体物性研究への早期導入が重要であると考えた。

テラヘルツ時間領域分光法自体、この10年ほどでかなり確立された技術となりつつあり、フォトニック結晶や一部半導体試料に対して測定が行われている。しかしながら一般的な固体物性測定で重要となる極低温や強磁場などの複合極限環境との組み合わせは、多くの場合、光学窓付超伝導磁石を光学台に載せるなどの大がかりな方法で実現されているのみで、我々が目指す10T以上の強磁場領域や1.5K以下の極低温領域での測定は今のところ難しい状況である。

この新規なテラヘルツ光技術を固体物性研究で広く、特に10T以上の強磁場下で利用するためには、第一に遠距離や狭空間への伝送手段の確立が非常に重要になる。その場合、曲げが難しい金属導波管や、湿度を伴う空間での光学系による伝送方法では、弱出力のテラヘルツ光を有効利用することは難しい。

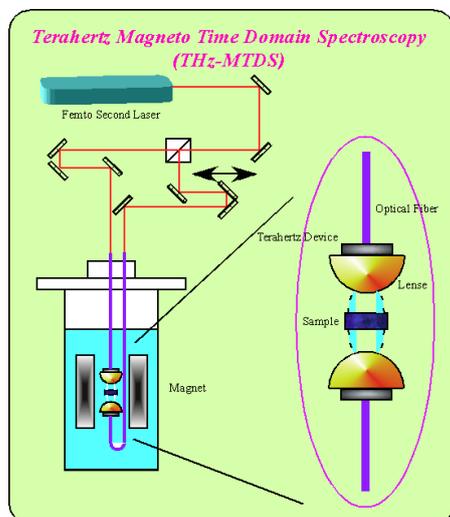


図1：テラヘルツ時間領域磁気分光

そこで本研究では、我々がこれまで強磁場極低温下での磁気光物性研究で実績のある光ファイバ技術を応用し、今回対象とする数THzまでの測定に関する要素技術の確立と周辺システムとの融合を図り、複合極限環境下でのテラヘルツ時間領域分光法システムの開発を目指す。

3. 研究の方法

今回、以下のような順に、要素技術を含め、研究開発を行った。

- (1)光伝導アンテナの作成開発、最適化
- (2)光学台上での一般的なテラヘルツ時間領域分光法の確立
- (3)超短パルス可視光のファイバ伝搬に関する分散補償の研究
- (4)磁場下での測定
- (5)サブミリ波領域での導波管システムの開発と強磁場極低温測定、4との比較。

具体的には、可視光伝送とテラヘルツ光発生部分を分離し、励起用パルス可視光を光ファイバにより遠距離、狭空間に伝送し、試料近傍の光伝導アンテナを励起してテラヘルツ光の発振を実現させる。そのために、様々な基板、電極形状、ギャップの距離などを変えた光伝導アンテナを自作し、光学台でのテラヘルツ時間領域分光法によりアンテナの評価を行う。それと平行し、光ファイバ中の伝搬により広がるパルス幅の制御のための分散補償の研究を行い、最終的に光伝導アンテナと光ファイバとを組み合わせ、強磁場下での測定を行う。今回扱うテラヘルツ光の周波数帯は3THz程度までで、特に1THz近傍の周波数帯の光強度が強い。この周波数帯はサブミリ波帯と呼ばれるため、従来型導波管システムによる強磁場磁気光学研究も行い、実験結果の比較を行う。

4. 研究成果

(1)光伝導アンテナとは、金属電極を半導体等の基板上に形成し、作成されたデバイスのことである。二つの金属電極間に電圧を印加した状態で、超短パルスレーザーを照射することによりテラヘルツ光が発生する仕組みとなっている。

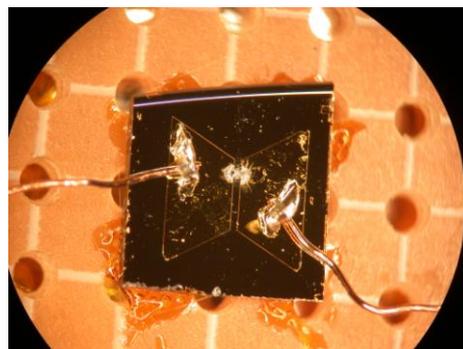


図2：今回作成したアンテナ

既に様々な光伝導アンテナの研究が進んでいるが、今回、分子線エピタキシー装置により作成した低温成長GaAsを使い、様々な形状のアンテナを自作し、最適化を図った。

第1図は、今回作成した典型的な光伝導アンテナで、ギャップ間の距離は 200 μm である。このギャップは従来のアンテナに比べてかなり広いが、これは今回開発するプローブで、光伝導アンテナと光ファイバとの結合を容易にするためである。実際、光学台上の場合とは異なり、ほとんど光学調整部が入れない強磁石中の狭空間では、光ファイバと結合させる上で光伝導アンテナのギャップは広い方が好ましい。しかしながら逆に印加電圧を小さくすることや光ファイバ伝送での限られた励起光強度という条件からは狭いギャップの方が好ましい場合がでてくる。そこで今回、ギャップ間距離が 10 μm から 400 μm までの様々なデバイスを作成し、特にプローブへの組み込みに現実的な 50-200 μm のアンテナを中心にテストを行った。

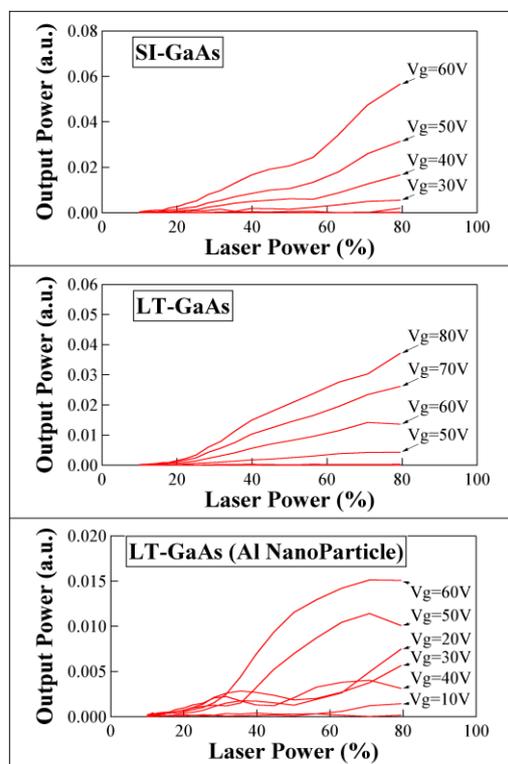


図3：今回作成したアンテナの特性

その結果、数十ボルトの電圧の印加下で、十分な発振強度を持つテラヘルツ光伝導アンテナの作成に成功した。テラヘルツ光強度の増加は、今回のデバイスでは励起強度に関して線形ではなかった。第3図はテラヘルツ光強度の印加電圧依存性である。電圧と共にピーク強度が増していることが分かる。特に、低温成長 GaAs では印加電圧を高くすることができる。また緩和中心として働くと考え、作成したアルミニウムナノ粒子入りの基板では、逆に耐圧特性が低くなり、アンテナ基板としては不都合なことが明らかになった。

(2) 次に作成した光伝導アンテナの評価も含

め、標準的なテラヘルツ時間領域分光を立ち上げた。また検出側は、液体ヘリウムを必要としない ZnTe のポッケルス効果によるバランス検出法を採用した。

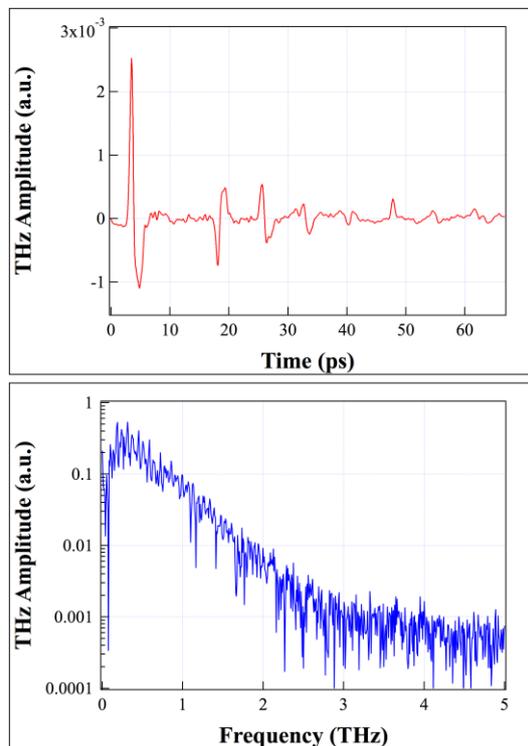


図4：テラヘルツ時間領域シグナル（上）、フーリエ変換後のスペクトル（下）

非常に高精度な移動ステージとオートバランス検出器を採用した結果、非常に微弱なテラヘルツ光を高精度に測定することが可能になった。図4は室温、常圧空間で測定したテラヘルツ時間領域シグナル（上）とフーリエ変換後のスペクトル（下）である。3THz程度の周波数範囲までスペクトルが伸びており、標準的なテラヘルツ時間領域分光が行えていることが分かる。

(3) 超短パルス光の伝搬に光ファイバを使用することで問題になることは、伝搬する超短パルス光の線幅が広がってしまうことである。この問題を解決するために、グレーティングを導入し、それぞれの波長成分に光路差をつけることで(逆分散)、ファイバ出射口で、入射口でのパルス幅と同程度にすること(分散補償)を試みた。6m程度までのシングルモードファイバに対応するファイバ分散補償装置(図5)を使い、入射パワーと出射パルス幅の関係について詳細に調べた。

その結果、120fsのパルス光の入射で、出射口で最大で 50mW、約 200fs のパルス光の伝送を実現した。これより1で作成した光伝導スイッチでも、十分にテラヘルツ光発振が可能となることが分かった。

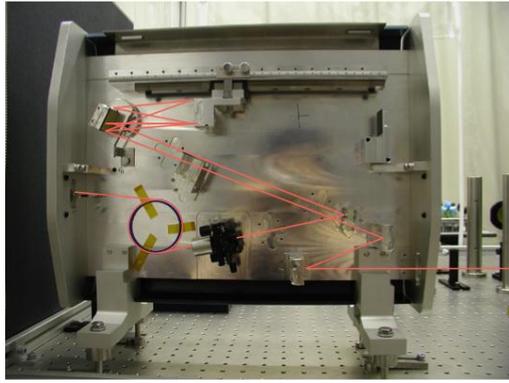


図5：分散補償装置

(4)次に光ファイバと光伝導アンテナの結合を図った。始めに顕微鏡などを利用して、光ファイバの接着時に使用される紫外硬化型接着剤による物理的な接着を試みたが、光ファイバとギャップの位置合わせの精度や接着による問題が多いため、途中より、直接的な接合ではなく、極小レンズ等による光伝導スイッチへの集光を行い、光伝導スイッチに光電流が流れることを確認した。

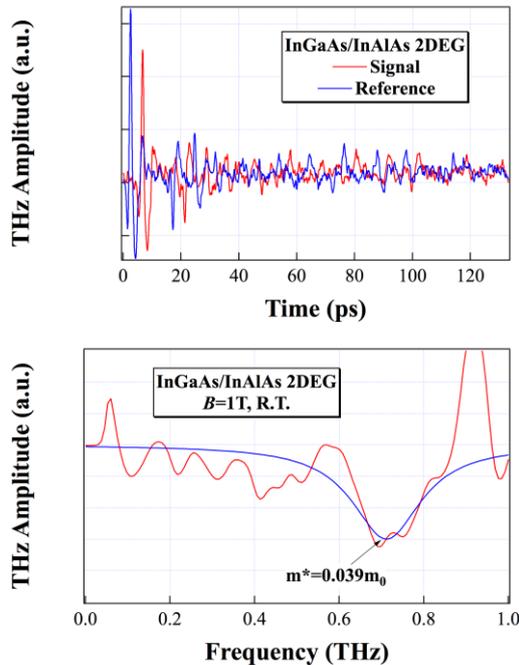


図6：InGaAs/InAlAs 2次元電子系のサイクロトロン共鳴

その後、InGaAs/InAlAs 2次元電子系の試料に対し、光学台上での短い距離ではあるものの、1 Tの強磁石を利用し、テラヘルツ時間領域分光法によるサイクロトロン共鳴の測定を室温で行った(図6)。プレリミナリーな結果ながら、共鳴吸収によるディップを観測することに成功した。

(5)1から4までの研究開発と平行し、今回開発中のテラヘルツ光システムによる実験結果との比較を行うためもあり、既存のサブミ

リ波光源と金属導波管プローブを作成し、1THz以下の領域でのサイクロトロン共鳴測定をZnOやInGaAs2次元電子系試料に関して行った。

その結果、ポーラロン効果やラッシュバ効果に起因する様々な興味深い実験結果を得ることに成功した。InGaAs 2次元電子系の測定では、時間領域分光により測定されたデータ同様、2次元電子の有効質量は $m^*=0.4m_0$ と特定され、その比較から4での測定データの正当性が明らかになった。またZnO 2次元電子系では、磁気輸送測定で観測されるシュブニコフドハース振動と同じ周期の振動が、サイクロトロン共鳴磁場よりも高磁場領域での磁気透過シグナルに現れることを見いだした。この振動は単なる干渉ではなく、2次元電子濃度に依存してその周期が変わることから、量子振動がその起源であることが明らかになった。

磁気光学的にこうした量子振動現象を観測できること自体、非常に興味深く、既にテラヘルツ時間領域分光によるファラデー回転への適用が始まっている。今後開発した本テラヘルツシステムの更なる強磁場、極低温下への適用を試みたい。

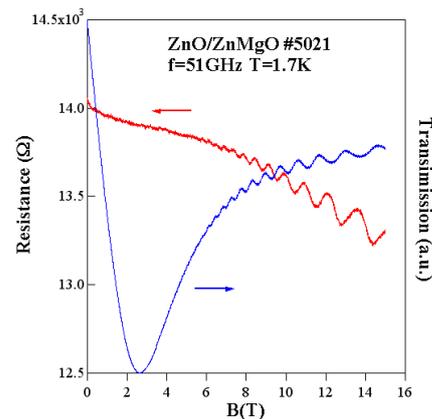


図7：ZnO 2次元電子系のシュブニコフドハース振動(左軸)と磁気透過測定(右軸)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ①Two dimensional polaron mass in ZnO quantum Hall systems, Y. Imanaka, T. Takamasu, H. Tampo, H. Shibata, S. Niki, Physica Status Solid C, Vol.7, Number 6, Page 1599~1601, 2010, 査読有
- ②Large Anisotropy in the Magnetic Susceptibility of Metallic Carbon Nanotubes, T. A. Searles, Y. Imanaka, T. Takamasu, H. Ajiki, J. A. Fagan, E. K. Hobbie, J. Kono, Physical Review Letters, Vol.105, Number1, Page017403-1~

017403-4,2010,査読有

③Cyclotron resonance of two-dimensional electron system affected by neighboring quantum dot layer, K. Takehana, Y. Imanaka, T. Takamasu, M. Henini, Applied Physics Letters, Vol.96,Number 19,Page 193110-1~193110-3,2010,査読有

④Cyclotron study of 2DES incorporating QD layer, K. Takehana, Y. Imanaka, T. Takamasu, M. Henini, Physica E, Vol.42,Number 4,Page 915~917,2010,査読有

⑤Magnetotransport properties of Ytterbium doped $\text{AlxGa}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ two-dimensional electron systems, T. Kaizu, Y. Imanaka, K. Takehana, T. Takamasu, Physica E, Vol.42,Number 4,Page 1126~1129,2010,査読有

⑥Possible Phase Transition Deep Inside the Hidden Order Phase of Ultraclean URu_2Si_2 , H. Shishido, K. Hashimoto, T. Shibauchi, T. Sasaki, H. Oizumi, N. Kobayashi, T. Takamasu, K. Takehana, Y. Imanaka, T.D.Matsuda, Y.Haga, Y.Onuki, Y.Matsuda, Physical Review Letters, Vol.102,Number 15,Page 156403-1 ~ 156403-4,2009,査読有

⑦Magneto-Optical Properties of n-type Modulation-doped $(\text{Cd,Cr})\text{Te}$ Quantum Well, F. Takano, T. Nishizawa, J. W. Lee, S. Kuroda, Y. Imanaka, T. Takamasu, H. Akinaga, Physica E, Vol.40,Page 1166-1168,2008,査読有

〔学会発表〕(計 32 件)

(1) 〔国際会議〕(以下を含めて計 10 件)

①Y. Imanaka, T. Takamasu, H. Tampo, H. Shibata, S. Niki, Magneto-optical and transport studies in ZnMgO/ZnO heterostructures at high magnetic fields, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors, 2010/07/25 - 2010/07/30, COEX, Seoul, Korea

②K. Takehana, Y. Imanaka, T. Mitsui, Y. Aono, T. Takamasu, Y. Kim, K. S. An, B. H. Hong, Cyclotron resonance of single-layer epitaxial grapheme, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors, 2010/07/25 - 2010/07/30, COEX, Seoul, Korea

③Y. Imanaka, T. Takamasu, G. Kido, G. Karczewski, T. Wojtowicz, Terahertz wave transmission for II-VI quantum Hall Systems at high magnetic field, 6th International Symposium on High Magnetic Field Spin Science, 2009/12/07 - 2009/12/09, Sendai, Miyagi, Japan

④Y. Imanaka, T. Takamasu, H. Tampo, H. Shibata, S. Niki, Two dimensional polaron mass in ZnO quantum Hall systems, 14th International Conference on II-VI Compounds, 2009/08/23 - 2009/08/28, St. Petersburg, Russia

⑤Y. Imanaka, K. Takehana, T. Takamasu, G. Kido, G. Karczewski, T. Wojtowicz, J. Kossut, Optical detected magnetoplasma effects in CdTe dense two dimensional electron systems, EP2DS-18, 2009/07/19 - 2009/07/24, Kobe, Hyogo, Japan

⑥K. Takehana, Y. Imanaka, T. Takamasu, M. Henini, Effect of Charge State in Nearby Quantum Dots on Quantum Hall Systems, EP2DS-18, 2009/07/19 - 2009/07/24, Kobe, Hyogo, Japan

⑦K. Takehana, Y. Imanaka, T. Takamasu, M. Henini, Cyclotron study of 2DES incorporating QD layer, EP2DS-18, 2009/07/19 - 2009/07/24, Kobe, Hyogo, Japan

⑧T. Kaizu, Y. Imanaka, K. Takehana, T. Takamasu, Magnetotransport properties of Ytterbium doped $\text{AlxGa}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ two-dimensional electron systems, RHMF2009, 2009/07/19 - 2009/07/24, Kobe, Hyogo, Japan

⑨T.A.Searles, J. Kono, Y. Imanaka, J. A. Fagan, E. K. Hobbie, Magneto-Optical Spectroscopy of Metallic Single-Walled Carbon Nanotube, 3rd Workshop on Nanotube Optics & Nanospectroscopy, 2009/06/07 - 2009/06/10, Sendai, Miyagi, Japan

⑩M. Behlmann, Y. Imanaka, K. Takehana, T. Kaizu, T. Takamasu, High-Field Study of Yb-Doped $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ Two-Dimensional Electron Systems, The Twenty-Second Annual Summer Research Colloquium, 2008/08/08-2008/08/08, 米国ライス大学

(2) 〔国内会議〕(以下を含めて計 22 件)

①今中康貴、高増正、赤堀誠志、新田峻介、山田省二、 $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}_2$ 次元電子系のサイクロトン共鳴、理学会第 66 回年次大会, 2011.3.26, 新潟大学、新潟県新潟市

②竹端寛治、中原悠揮、三井正、今中康貴、高増正、Y. Kim, K. S. An, B. H. Hong, CVD エピタキシャル成長単層グラフェンの評価, 第 58 回春季応用物理学会, 2011.3.01, 神奈川工科大学

③今中康貴、高増正、赤堀誠志、新田峻介、山田省二、 InGaAs 2 次元電子系のサイクロトン共鳴, 第 15 回半導体スピン工学の基礎と応用, 2010/12/20 - 2010/12/21, 筑波大

学、茨城県つくば市

④表者名：今中康貴、高増正、反保衆志、柴田肇、仁木栄、ZnMgO/ZnO ヘテロ接合試料における磁気光学測定，日本物理学会 2010 年秋季大会，2010/09/23 - 2010/09/26，大阪府立大学、中百舌鳥キャンパス、大阪府堺市
⑤竹端寛治、今中康貴、三井正、高増正、Y. Kim、K. S. An、B. H. Hong，単層グラフェンにおけるサイクロトロン共鳴，日本物理学会 2010 年秋季大会，2010/09/23 - 2010/09/26，大阪府立大学、中百舌鳥キャンパス、大阪府堺市

⑥山田省二、新田峻介、岩瀬比宇麻、赤堀誠志、今中康貴、高増正、InGaAs/InAlAs 2 次元電子ガス系における強磁場下磁気抵抗とスピン分裂磁場依存性，日本物理学会 2010 年秋季大会，2010/09/23 - 2010/09/26，大阪府立大学、中百舌鳥キャンパス、大阪府堺市
⑦今中康貴、高増正、新田峻介、山田省二、InGaAs 2 次元電子系のミリ波サイクロトロン共鳴 II，日本物理学会第 65 回年次大会，2010/03/20 - 2010/03/23，岡山大学、岡山県岡山市

⑧今中康貴、高増正、新田峻介、山田省二、InGaAs 2 次元電子系のミリ波サイクロトロン共鳴，日本物理学会 2009 年秋季大会，2009/09/25 - 2009/09/28，熊本大学、熊本県熊本市

⑨今中康貴、高増正、竹端寛治、反保衆志、柴田肇、仁木栄、ZnO 2 次元電子系のサイクロトロン共鳴，日本物理学会 2009 年秋季大会，2009/09/25 - 2009/09/28，熊本大学、熊本県熊本市

⑩竹端寛治、今中康貴、高増正、M.Henini、L.Eaves，量子ドット-2 次元電子結合系のサイクロトロン共鳴，日本物理学会 2009 年秋季大会，2009/09/25 - 2009/09/28，熊本大学、熊本県熊本市

⑪海津利行、高増正、竹端寛治、今中康貴、Yb ドープ 2 次元電子系における Yb トラップ準位の考察，日本物理学会 2009 年秋季大会，2009/09/25 - 2009/09/28，熊本大学、熊本県熊本市

⑫今中康貴、ZnO 2 次元電子系のサイクロトロン共鳴，特定領域研究”100 T 領域の強磁場スピン科学”スタートアップ会議，2009/05/22 - 2009/05/23，東京大学、千葉県柏市

⑬今中康貴、MVNA による量子ホール系の磁気透過測定，特定領域研究”100 T 領域の強磁場スピン科学”スタートアップ会議，2009/05/15 - 2009/05/16，東京大学、千葉県柏市

⑭今中康貴、高増正、反保衆志、柴田肇、仁

木栄，酸化亜鉛 2 次元電子系におけるサイクロトロン共鳴，2009 年春季 第 56 回応用物理学関係連合講演会，2009/03/30-2009/04/02，筑波大学、茨城県つくば市

⑮今中康貴、竹端寛治、高増正、木戸義勇、G.Karczewski、T.Wojtowicz、J.Kossut、II-VI 族希薄磁性半導体 2 次元電子系のサイクロトロン共鳴，日本物理学会第 64 回年次大会，2009/03/27-2009/03/30，立教大学、東京都豊島区

⑯竹端寛治、今中康貴、高増正、M. Henini、L. Eaves，量子ドット-2 次元電子結合系のサイクロトロン共鳴，日本物理学会第 64 回年次大会，2009/03/27-2009/03/30，立教大学、東京都豊島区

⑰今中康貴、竹端寛治、高増正、木戸義勇、G.Karczewski、T.Wojtowicz、J.Kossut，希薄磁性半導体量子ホール系の強磁場テラヘルツ分光，物性科学領域横断研究会”スピンが拓く物性科学の最前線”，2008/11/29-2008/12/01，東京大学、東京都文京区

⑱今中康貴、竹端寛治、高増正、木戸義勇、G.Karczewski、T.Wojtowicz、J.Kossut，ミリ波サブミリ波帯における CdMnTe 量子ホール系の磁気透過測定，日本物理学会 2008 年秋季大会，2008/09/20-2008/09/23，岩手大学、岩手県盛岡市

⑲今中康貴、高増正、反保衆志、柴田肇、仁木栄，酸化亜鉛 2 次元電子系の有効質量，2008 年秋季 第 69 回応用物理学学会学術講演会，2008/09/02-2008/09/05，中部大学、愛知県春日井市

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.nims.go.jp/nmp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

今中 康貴 (IMANAKA YASUTAKA)
独立行政法人物質・材料研究機構・量子ドットセンター・主任研究員
研究者番号：70354371

(2)研究分担者

なし

(3)連携分担者

なし