

テラヘルツテクノロジーフォーラム通信

Vol.4, No.1 (2006)

テラヘルツ分光法への期待

弊社が 1978 年に設立され、分析サービス事業を始めて今年で 28 年目を迎えている。設立当時、自社で行われている分析業務を外部に委託（アウトソーシング）する習慣や風土もなく、ビジネスとして本当に定着するかどうか危惧されていたが、おかげさまでその後順調に成長することができた。これは、研究開発の内容が一段と高度化・微細化され、分析の重要性が増し大手企業といえども、専門性の高い分析装置を導入し高度な分析技術者を抱えていくことが困難になり、自社内だけでは高度な分析ニーズに対応できなくなってきたことや、研究・技術開発にスピードが要求され開発のサイクルが短くなり、分析のアウトソーシングが一段と加速されたことなどが背景にある。

筆者も設立以来、分析事業に従事してきているが、この間の分析技術の進歩には目を見張るものがある。筆者が担当者として第一線で従事していた赤外・ラマン分光法分野について、一端を紹介させていただく。

FT-IR が市販され出した 1970 年代の後半に、弊社では国内の民間企業としては最初に FT-IR 1 号機（Digilab）を導入し、筆者も FT-IR の立上げの業務に従事することになった。当時の赤外分光計の主流は、分散型の分光計であり、国内の大学の専門の先生方の多くは当時としては高価な FT-IR には関心を示されていなかったように思う。FT-IR を用いて種々の新しい応用展開を行う中で、分析装置として以下のようなすぐれた特徴を実感していた。 FT-IR の感度の高さ（電子スペクトル並み）、操作性の良さ（PC コントロール）、分析スピード（測定の速さ）。筆者らはこのような特長を生かし、FT-IR を従来の赤外分光法では対応不可能であった材料・デバイス等の表面・微小部分分析に積極的に展開を図った。微小部分分析については、ビームコンデンサーを経て顕微 FT-IR 法へと発展し、現在では微小部分分析における不可欠の手法として定着している。毎年、200 台以上（約 25 億円）の顕微 FT-IR 装置が販売され広範な分野で活用されている。表面分析においては、ATR（全反射）法、DRIFT（拡散反射）法及び RAS（高感度反射）法等の手法が、高感度な表面分析手法として定着し、広範な材料・デバイスの表面分析に用いられている。このように、FT-IR の出現は、従来の赤外分光法の枠をはるかに超えて発展し、分析装置として今日の隆盛を見るに至っている。

弊社では、栃木ニコン様の協力を得て約 3 年前から、テラヘルツ分光法の種々の材料への応用の可能性を検討している。現在、医薬品の結晶多形解析や高分子材料の微細構造解析等で他の手法では得られない有用な知見を得ている。弊社のような分析サービス機関において、テラヘルツ分光法が分析手法として定着するには、様々な試料の測定が容易にできること、スペクトルのデータベースが蓄積されていること、スペクトルの解釈が普遍的で分かりやすいこと等が課題であろう。今後の基礎的・応用的研究から、テラヘルツ分光法が FT-IR のように特長ある分析手法として発展していくことを期待している。

石田英之（東レリサーチセンター、テラヘルツテクノロジーフォーラム監事）

広帯域時間領域分光

大阪大学大学院基礎工学研究科 芦田昌明

テラヘルツ周波数帯では、時間領域分光という新規手法が広く用いられている⁽¹⁾。テラヘルツ波パルス電場の時間応答を直接測定し、そのフーリエ変換からスペクトル情報を求めるというもので、強度のみしか検出できないこれまでの赤外分光法と比べて、位相情報も容易に得られるのが特徴である。このため、透過または反射測定の際に電場の位相変化も分かり、強度変化と併せて2つの情報を得ることができる。従って、誘電関数の実部と虚部、例えば吸収係数と屈折率などが同時に求められ、この際、Kramers-Kronig変換、エリプソメトリーなどを行う必要がない。さらに、パルス波を使用しているため、(背景輻射の影響がなく) 検出素子は室温で動作、広いスペクトル領域を一度に測定可能、試料内部のパルス波伝播の様子を追跡しながら解析処理が可能 (例えば、試料表面での多重反射の影響を分離可能) といった特徴を有し、超高速ポンプ-プローブ分光(パルス光を用いて、ポンプ光で励起された物質の励起状態を分光する手法)への展開も容易である。パルス電磁波を用いた測定は、核磁気共鳴分光では既に標準的になっているが、ラジオ波と違ってテラヘルツ波電場をエレクトロニクスで直接検出することは不可能で、超短パルスレーザーの利用が必須となる。近年のフェムト秒レーザー技術の普及がテラヘルツ時間領域分光研究の隆盛をもたらした。赤外分光においては、フーリエ分光器(FTIR)が回折格子分光器に完全に置き換わったが、時間領域分光は第3世代としてFTIRを凌駕する特徴を持っているものと考えられる。しかし、残念ながらこれまで、この分光法の高周波側の適用範囲は数THz程度までに限定されていた。このため測定対象が非常に限定され、非専門家も広く利用する手法として普及するには至っていない。少なくとも広範な分野で使用されている近・中赤外用FTIRがカバーする領域に繋げる必要があり、十数THzまで測定可能領域を広げることが重要であると考えている。最近、中赤外域をカバーして100THzを超える超高周波域まで時間領域分光法を拡張する試みが行われつつある^(1,2)。ここでは我々の取り組みを報告する。

テラヘルツ時間領域分光法は大きく分けて2通りある。光伝導アンテナと呼ばれる素子を使う方法と非線形光学を用いる電気光学(EO)サンプリング法(以下、EO法)である。前者は、低温成長GaAsのようなキャリアの寿命が短い基板に、金などで作製されたアンテナ構造である。その中央部にはギャップが存在し、そこにゲート光が照射されたときに光キャリアが生成される。その部分にテラヘルツパルス電場が入射すると、キャリアは電場によって加速され、電流が流れることになる。ゲート光パルスの時間幅と基板の光キャリアの寿命が入射電場の時間変化に対して無視できる程短ければ、アンテナからの平均電流は、符号も含めて入射テラヘルツ電場の瞬間値に比例し、ゲート光パルスと入射パルス電場の時間差を走査しながら電流値を測定すれば、テラヘルツ電場の時間応答が得られることになる。アンテナを使うということから、高周波成分の測定はEO法よりも不利だと考えられてきたが、通信総合研究所(現情報通信研究機構)の河野らはその感度が60THzにまで及ぶことを明らかにした⁽³⁾。これは世界に先駆けて行われた日本発の成果であり、さらに大きく飛躍させるべく、我々は光伝導アンテナのさらなる広帯域化を進めている。

高周波側の検出限界を調べるために行った実験結果を図1(a)に示す⁽⁴⁾。パルス幅10fs程度と非常に短いモード同期チタンサファイアレーザーを用いた。なお、超広帯域赤外光パルスは、厚さ30 μm のGaSe結晶(の光整流)を用いて発生した。図に示す通り、幅12fsの超高周波成分が検出されている。この時間応答のフーリエ変換を行ったスペクトルが図1(b)である。高周波側の強度が低下しているが、100THz程度まで検出できている。これはアンテナを用いた電場時間応答の直接検出としては最も周波数の高い実験結果であり、膨大な蓄積のあるアンテナ工学の成果を赤外域にまで適用できる可能性を

秘めている重要な成果であると考えている。また、よりパルス幅の短いレーザーを使用することで、さらなる広帯域化が可能であると理論的に予想している。

ここで、10THz 以下の強度の低下は GaSe 結晶の吸収によるものである。低周波側の感度を明らかに

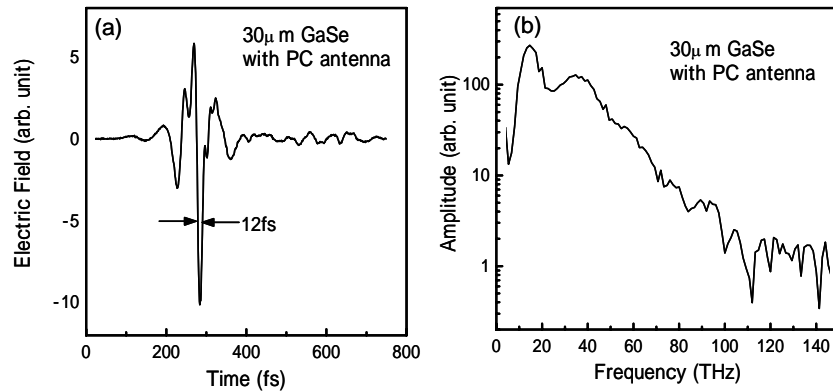


図 1 光伝導アンテナで検出したテラヘルツパルス電場の時間応答(a)とそのフーリエ変換スペクトル(b)

20-30THz 付近のディップは GaSe 結晶の位相整合条件によるものである。10THz 以下の強度低下は GaSe 結晶の吸収による。

するために、発生源にも光伝導アンテナを用いた実験を行った⁽⁵⁾。これまでのところ、光整流よりは低周波域までしか発生できていないが、スペクトル応答は 0.1THz から 25THz 程度まで滑らかな減衰曲線を示している、光伝導アンテナはこの範囲においても切れ目なしに感度をもっていることがわかった。先の結果と合わせると、光源の取り替えは必要なものの、0.1THz から 100THz の 3 桁にも及ぶ周波数領域を 1 個の光伝導アンテナで検出可能であることが明らかとなった。また、スペクトル応答は単調な変化をしているため、光伝導アンテナによる検出は超広帯域赤外分光測定に適している。現在は、さらなる広帯域化を進めると同時に、物性研究への適用も行っている。

最後に、広帯域測定で現在主流となっている EO 法に対する利点をあげる。この方法では、テラヘルツ電場の EO 効果によって非線形結晶中に生じる屈折率変化を、同時に入射するプローブ光パルスの偏光状態の変化として検出する。このため、偏光子と光検出器の組合せが必須で、調整は複雑かつ困難になる。また、広帯域化に必要な位相整合条件を満たすため、非常に薄く (< 0.1mm) 脆弱な結晶を使用する必要がある。これに対し、光伝導アンテナを用いる場合は、単一の素子を使用しているため光学調整が容易であり、素子自体も堅牢である。また、EO 法では、非線形結晶のフォノン吸収で検出できない領域 (多くの化合物半導体の場合、5-10THz 付近) が存在するが、光伝導アンテナの場合は、基板表面の反射による軽微な影響を受けるのみで、不感帯は存在しない。こうした点から、光伝導アンテナによる超広帯域時間領域分光法は、汎用の赤外分光装置に最適なものであると結論できる。

本稿の内容は、情報通信研究機構未来 ICT 研究センターの齋藤伸吾博士、阪井清美元特別研究室長らとの共同研究によるものであり、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業さきがけ、並びに文部科学省科学研究費補助金の援助を受けて行われた。

参考文献

- (1) K. Sakai ed., *Terahertz Optoelectronics*, (Springer, 2005).
- (2) R. Huber, F. Tauser, A. Brodschelm, M. Bichler, G. Abstreiter and A. Leitenstorfer, *Nature* **414**, 286 (2001).
- (3) S. Kono, M. Tani and K. Sakai, *IEE Proc. Optoelectronics* **149**, 105 (2002).
- (4) M. Ashida, A. Doi, H. Shimosato, S. Saito, K. Sakai and T. Itoh, *Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO) 2005*, CFD3.
- (5) H. Shimosato, M. Ashida, S. Saito, T. Itoh and K. Sakai, *Ultrafast Optics V*, (Springer, 2006) in press.

本研究室では、ミリ波・テラヘルツ波帯の技術を開拓・実用化するために、本領域で動作する新しい電子デバイスおよび回路システムの創出と、それらの情報通信・計測システムへの応用に関する研究開発を行っている。

ミリ波・テラヘルツ波帯電子デバイス・回路システムの研究開発に関しては、第一に、半導体ヘテロ接合構造に発現する2次元プラズモンの共鳴効果という新しい動作原理に立脚した、周波数可変で光波との同期が可能な集積型のコヒーレント電磁波発生・信号処理デバイスの研究開発を進めている。電子デバイスにおける走行時間限界と光子デバイスにおけるフォノン散乱限界を同時に克服するブレイクスルーとして注目している。

第二に、サブ波長領域に局在した低次元プラズモンの分散特性を電子的光学的に制御することによって、ミリ波テラヘルツ波帯での複雑な信号処理機能を果たす新規な回路機能システムの創出に関する研究開発を進めている。これらのミリ波・テラヘルツ波帯デバイス・回路の応用として、新しい情報通信・計測システムの開拓に向けて、テラヘルツ帯を中間周波数帯として利用する次世代光パケット交換方式や光・ミリ波リンクシステムの研究、およびミリ波・テラヘルツ波帯時間分解電磁界計測システムの研究を行っている。

最近の成果として、GaAs系ヘテロ接合材料によるプラズモン共鳴フォトミキサーデバイスの試作状況を紹介します。図1に試作デバイスの断面写真を示す。2重回折格子型ゲートおよびITOミラーによる縦型共振器の独自構造を導入することによって、プラズモン励起効率と電磁波放射利得の向上が図られ、テラヘルツ帯電磁波放射の室温動作に初めて成功した。図2に代表的な電磁波放射スペクトルを示す。図3には、テラヘルツ帯電磁波放射の測定に用いた電気光学サンプリングシステムを紹介する。その他、フーリエ変換サブミリ波分光システムやミリ波ベクトルネットワークアナライザを備えている。数値解析・モデリングから設計・製造・評価まで、一貫した研究開発を推進している。

URL <http://www.otsuji.riec.tohoku.ac.jp/>

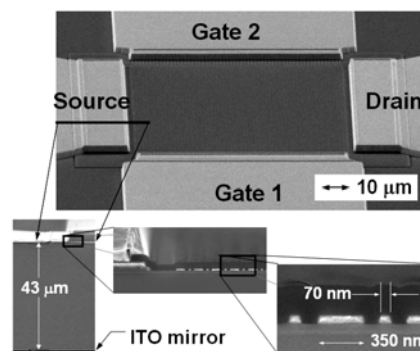


図1 プラズモン共鳴フォトミキサー

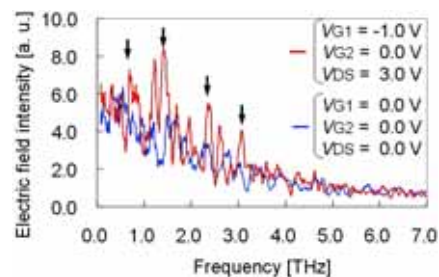


図2 試作素子の電磁波放射スペクトル

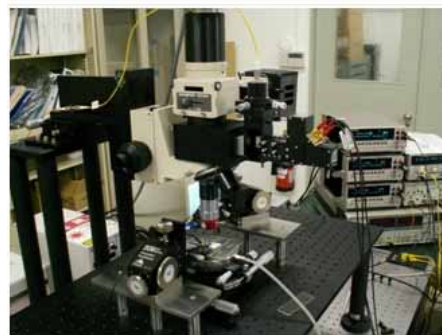
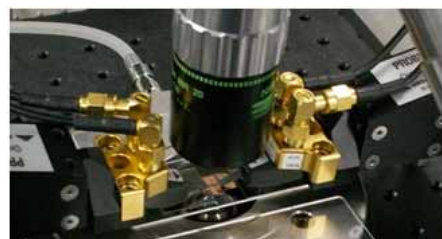


図3 電気光学サンプリングシステム

会議報告

< 第4回研究会・見学会 >

2006年3月7日に東京駒場キャンパスおよび生産技術研究所で第4回テラヘルツテクノロジーフォーラム研究会・見学会が開催された。この研究会・見学会はテラヘルツテクノロジーの最先端の情報を研究現場近くで提供することを目的としている。今回の研究会・見学会では約40名の参加者があり、今後の研究開発等に大いに役立つような充実した内容であった。

まず阪井清美フォーラム会長のテラヘルツ分光に関するレビューの後に、東京大学大学院総合文化研究科の小宮山進教授がテラヘルツ光に対する量子ホール効果検出器や半導体量子ドットによる単一光子検出器について講演し、量子ホール電子系からの極微弱テラヘルツ発光のイメージングについての紹介をおこなった。また、東京大学生産技術研究所の平川一彦教授が Gunn 効果を示す GaAs のキャリアの過渡速度とテラヘルツ領域での光学伝導度の評価、および半導体超格子中の電子のプロッホ振動について講演し、時間領域測定によって高周波デバイスを簡単に評価できることを示した。最後に韓国浦項理工大の Haewook Han 博士による韓国におけるナノテラヘルツフォトンクス研究に関する動向と最新のテラヘルツ近接場顕微鏡に関する講演があった。

後半では2つのグループに分かれて小宮山研究室および平川研究室の見学会を行った。小宮山研究室では実験室と試料準備室を、平川研究室では実験室と MBE 装置およびクリーンルームをいくつかのサブグループに分かれて見学した。
(京都大学 永井正也)

< POISE (Physics of Intersubband Semiconductor Emitters)サマースクール >

POISE は、Sheffield 大(幹事校)、Cambridge 大、Neuchâtel 大、パリ第7大、Scuola Normale Superiore、Alpes Lasers など10の大学・ベンチャー企業が参加して、次世代の量子カスケードレーザやそれに関連するテラヘルツ光源の基礎研究を推進する EU の研究ネットワークである。この POISE が主催して、大学院生、ポスドクを対象としたサマースクールを6月26～30日に、イタリア中部のトスカナ地方にあるコルトナ(Cortona)で開催した。コルトナは、数年前”Under the Tuscan Sun”という小説と映画で急に有名になったところで、英米から若い女性が観光に訪れていたが、とんでもなく田舎である。



サマースクールは、幹事の Cockburn 教授と現地実行委員の Tredicucci 教授が運営する at home なものであった。会場はコルトナの高台にある数百年前に建てられたイタリア貴族のお城(Il Palazzone ; 写真)で、フレスコ画が描かれた広間で発表が行われるという貴重な体験をさせて頂いた。

サマースクールの会場
となった Il Palazzone

参加者は、POISE に参加している10機関のみならず、欧州の研究機関から広く集まっており、講師(13名)、ポスドク、大学院生の合計で約70名程度であった。セッションは、講師が1時間のレビュー講義を行ったほか、ポスドク、大学院生からの oral、poster の発表からなっていた。興味のある方は、プログラム(抜粋)等を <http://www.shef.ac.uk/physics/research/rtn/summer.php> でご覧頂

きたい。私が滞在したのは最初の2日間だけであるが、量子カスケード構造における放熱、短波長化、非線形効果などについて活発な議論がなされていた。また、World Cup でイタリアが出場する時間帯は、発表が別の日に延期になるというイタリアならではの雰囲気も興味深かった。

今回、やはり一番感じたことは、欧州では気鋭の若手研究者が70名以上、量子カスケード構造の研究に携わっているということであり、日本での本分野の研究人口の少なさを痛感した。また、テラヘルツ関連の EU プロジェクトがスクールなどを企画し、本格的な研究支援をしているということも重要である。日本もがんばらねば・・・

最後になるが、コルトナでは今年の欧州の異常高温気象のはしりの天気、毎日 40°C にも達する異常な気温であった。言うまでもなく、お城にはエアコンは無く、寝るときは蒸し風呂のようだった。

(東京大学 平川一彦)

<量子構造サブバンド間遷移の応用と物理に関する研究会>

6月16日(金) 近年急速な展開を見せている量子カスケードレーザを含む半導体量子井戸構造中のサブバンド間遷移に関する研究会が、(独)情報通信研究機構小金井本部にて開催された。サブバンド間遷移はそのエネルギーが材料と量子井戸構造の選択で 0~0.8 eV 程度の範囲で可変であり、赤外吸収や発光の原理として古くからの研究がある。2002年の THz カスケードレーザの実現などもあって、最近さらに研究が活発化している。

研究会は3件の招待講演

- ・「量子カスケードレーザの開発とその分光応用」(浜松ホトニクス(株)、枝村忠孝氏)
- ・「サブバンド間遷移を用いた InGaAs 負性抵抗トランジスタ」(産総研、牛頭信一郎氏他)
- ・「GaN 系サブバンド間遷移の超高速光スイッチへの応用」(株東芝、飯塚紀夫氏他)

のほか、一般講演が6件行われ、比較的余裕のあるプログラム構成もあって、活発な議論が展開された。テラヘルツ関係では「Development of terahertz range quantum well detector」(情報通信研究機構、M.Patrashin 氏他)および「GaAs 計超格子におけるプロッホ振動電子のテラヘルツ利得と位相緩和機構」(東大生産研、鶴沼毅也氏他)の発表があった。参加者は42名であった。

応用物理学会テラヘルツ電磁波技術研究会では、昨年12月にも「テラヘルツデバイス」と題する研究会を開催したが、今後もトピックスを選んでゆったりとしたプログラム編成で議論の深まる研究集会を開催してゆく予定であり、会員、非会員を問わず取り上げてほしいテーマなどがあれば、代表(東大生産研、平川)または世話人(窓口: 広大先端、角屋)までご連絡いただきたい。

(広島大学 角屋豊)

<【第6回研究会】電子情報通信学会テラヘルツ応用システム研究会:活動報告>

7月13日・14日の両日にわたり、東北大学電気通信研究所において、第6回テラヘルツ応用システム研究会を開催いたしました。招待講演5件、一般講演8件の計13件の大変興味深い講演が行われ、参加者は約70名と現在まで最大の数となりました。招待講演は、宇宙観測関連で「赤外天文衛星あかり」・「ALMA」デバイス関連で「量子カスケードレーザ」・「ショットキーバリアダイオード」、さらに「テラヘルツ波の農学応用」の講演があり、何れも盛んな質疑が行われました。一般講演では、セラミックス多層技術を応用したテラヘルツ帯のバンドパスフィルタに関する講演(村田製作所)があり、テラヘルツ技術が発振器・検出器といったところから、周辺技術開発へ広がってきていること

を感じさせるものでした。ご講演・ご参加いただきました皆様、また、現地にて会場準備を行っていただいた皆様にこの場をお借りして感謝申し上げます。 (情報通信研究機構 竇迫 巖)

< 2006 分析展 >

昨年度に引き続き、2006年度分析展に出展しました。展示としてパネルを11枚、装置の例として京都大学田中研の小型TDSおよび大阪大学斗内研LTEMを展示しました。3日間のブース訪問者数はおよそ550名で、休む間もなく応対に追われるほど盛況でした。テラテクフォーラムのパンフレットも飛ぶようになりました。キラーアプリケーションは何なのか、装置の価格などに関する質問も多く、テラヘルツ技術に関する関心の高さを感じました。

(京都大学 田中耕一郎)

テラヘルツ関連会議案内

< テラヘルツテクノロジーフォーラム 第5回研究会・見学会のご案内 >

テラヘルツテクノロジーフォーラムでは、テラヘルツテクノロジーの最先端を皆様に分かりやすくお伝えする「研究会」と研究現場の「見学会」を定期的におこなっております。第5回目は、独立行政法人情報通信研究機構(東京小金井)において開催します。日本で初めて発振に成功した、テラヘルツQCL、その作成を行っているクリーンルーム、気球搭載サブミリ波観測装置などを見学します。研究会では、今回特別に欧州宇宙機関からドゥマグト博士をお招きし、テラヘルツリモートセンシング技術に関する講演、情報通信研究機構テラヘルツプロジェクトの瀬田博士による大気減衰計測と竇迫博士によるテラヘルツQCLに関する講演をしていただきます。

開催日時 2006年12月5日(火) 13:00~17:00
開催場所 独立行政法人情報通信研究機構 本館4F国際会議室
〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1
TEL(代表) 042-327-7429 URL: <http://www.nict.go.jp/about/hq.html>
定員 研究会 150名, 見学会 45名(定員になり次第締め切らせていただきます。)
参加費 一般会員 無料、個人会員 1,000円、協賛研究会・委員会の会員 2,000円、
非会員 3,000円、学生 500円 (研究会のみの場合も同じ)

お申込は、下記のホームページから受け付けています。多くの方々のご参加お待ちしております。
<http://www.terahertzjapan.com/event2006kenkyukai.html>

プログラム 13:00~17:00

研究会の部(13:00~14:45)

13:00~13:55 「Terahertz Technology for Space and Earth Applications」
Peter de Maagt (European Space Agency)
13:55~14:20 「テラヘルツ時間領域分光法による水蒸気のスペクトルの圧力広がり係数測定」
瀬田孝将 (情報通信研究機構)
14:20~14:45 「テラヘルツ量子カスケードレーザーとその応用可能性」

見学会の部 (15:00 ~ 17:00)

A、B、Cの3グループ各15名に分かれて見学。
THz - BASICラボ (本館1F) QCLなど
B - SMILES (6号館1F) 気球搭載サブミリ波装置
フォトニックデバイスラボ (PDL) クリーンルーム, MBEなど

< 応用物理学会 テラヘルツ電磁波技術研究会 >

開催日時 2007年3月2日(金) ~ 3日(土)
開催場所 未定 (関西地区を予定)

< 国際会議予定 >

OSA Topical Meeting on Optical Terahertz Science and Technology

March 18-21, 2007, Rosen Plaza Hotel, Orlando, Florida, USA

<http://www.osa.org/meetings/topicals/otst/>

Submission deadline: November 7, 2006 Pre-Registration deadline: February 26, 2007

CLEO/QELS 2007

May 6-11, 2007, Baltimore, Maryland, USA, <http://www.cleoconference.org/>

Submission deadline: December 1, 2006

IRMMW-THz 2007 (TBA)

September 2-7, 2007, Cardiff, UK, http://www.irmmw-thz.org/future_conf

Submission of abstracts: March 19, 2007

テラヘルツテクノロジーフォーラム入会方法
下記事務局までご連絡ください。

テラヘルツテクノロジーフォーラム通信 Vol.4 No.1 1000部 無料

発行日 2006年11月8日

企画・編集 田中 耕一郎 (京都大学大学院理学研究科)

電子メール: kochan@scphys.kyoto-u.ac.jp

発行 テラヘルツテクノロジーフォーラム事務局

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

京都大学大学院理学研究科 物理学第一教室 光物性研究室

Tel / Fax 075-753-3757

E-mail: teratech@terahertzjapan.com

<http://www.terahertzjapan.com>