

テラヘルツテクノロジーフォーラム通信

Vol.6, No.1 (2008 年度)

巻頭言

「検出器の発展からみたテラヘルツ技術」

株式会社インフラレッド、テラヘルツテクノロジーフォーラム監事
森 哲男

私が赤外線検出器の業界で仕事を始めて 30 年以上も経ってしまいました。

InSb や HgCdTe の検出器も、軍用の赤外技術発展とともに、今ではアレイ型や FPA で入手できるようになりました。実際に購入するとなると、米国ペンタゴンからの制約を受けることは多々ありますが、最高性能の 10 μ m 帯の軍用転用可能な赤外線検出器以外は、学術研究目的でしたら許可申請を申し入れる価値は出てきました。また軍用・通信用のショットキーダイオード検出器等の MMIC 等のミリ波デバイス技術の発展から、近年、サブテラヘルツ帯の検出技術もどんどん高周波域へ広がってきました。

この周波数域では、電波天文学やプラズマ物理の発展も極低温動作の検出器の発展に大きく寄与してまいりました。

遠赤外分光は、コンピュータの高速化と並行して FTIR 装置の発展が進み、昔のような分散型の分光器では考えられないほど簡易にテラヘルツ域の分光分析ができるようになりました。それでも、FTIR 装置で使用している光源の強度限界から、100 ミクロン以上の長波長域ではなかなか苦勞して測定しておりました。4.2k の液体ヘリウムデュワーに入ったシリコン・コンポジット・ボロメータが、遠赤外域(テラヘルツ域)の測定用 FTIR 装置には欠かせない検出器になりました。より長波長のミリ波域の分光には、同じく 4.2k 動作のホットエレクトロン InSb(0.5mm \sim 5mm)か、減圧して 1.6k 辺りで最適化したシリコン・コンポジット・ボロメータ(0.1mm \sim 2mm)が FTIR と一緒に使われました。

4.2k 動作のホットエレクトロン InSb は、まず 1mm から 3mm 帯の大気の窓でのミリ波電波天文学によって使われ始めました。さらには、SIS 超伝導ミキサと局発を使って、高分解能分光測定も進歩してまいりました。高速応答(\sim 1MHz)ということもあり、核融合プラズマの ECE 測定に使われております。この検出器での高速スキャンの FTIR やポリクロメーターも、世界の核融合実験炉で使われております。

磁場チューンした InSb(1.5THz \sim 0.1THz)も市場に出てきましたが、これは高速応答で高感度なテラヘルツ域検出器として使われ始めました。

他に、現在ではあまり一般には使われておりませんが、液体ヘリウム温度付近で動作するテラヘルツ(遠赤外)域の検出器としては、Ge:Cu (2 μ m \sim 30 μ m), Si:Ga (5 μ m \sim 18 μ m), Si:B (7 μ m \sim 33 μ m), Ge:Be (30 μ m \sim 50 μ m), Ge:Ga (35 μ m \sim 120 μ m), Stressed Ge:Ga (50 μ m \sim 200 μ m), Ga:As (100 μ m \sim 300 μ m) 等が使われてまいりました。液体ヘリウム冷却で、それぞれ限定波長感度域を持つこれらの検出器は、Ge:Ga を除いては殆ど販売されなくなりました。

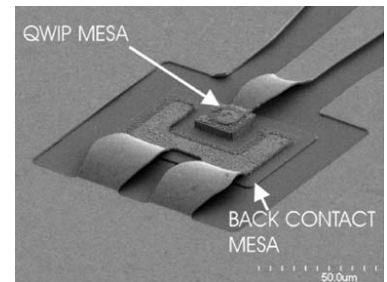
その頃から近年、テラヘルツ域の光源や検出器が次々と開発され、その領域の高輝度光源が多数出現し、

テラヘルツ域の分析装置としても販売されるようになってきました。

電波天文学の検出器はどんどん極低温動作で低雑音になっていきますし、面としてのイメージ画像情報も、積分時間を工夫して、どんどん高感度・高分解な物になってきております。

昔は、極低温域でしか使えなかった QWIP(量子井戸型赤外線検出器)も、半導体プロセス技術の画期的な進歩により、QCL テラヘルツ域光源の動作温度の上昇と同様、テラヘルツ域 QWIP でも動作温度が以前より高いものや FPA になったものも作られるようになってきました。QWIP は QCL 光源と同様な構造ですのでそれほど広帯域な検出器はできませんが、超高速(数 GHz の応答)・高感度のため限定波長帯ではありますが、将来、動作温度がどんどん高くなれば、半導体プロセス技術ですので将来非常に期待できる検出器です。この検出器の発展におきましても、軍事研究への応用が進歩速度を加速してきました。

現在、私が最も期待している FPA は、これも軍事応用からスタートした常温マイクロボロメータの FPA です。セキュリティ用に赤外線カメラへの応用が確立しましたが、ボロメータですのでテラヘルツ域でも感度がある物も多いはずですが、常温マイクロボロメータの FPA で、赤外域限定のフィルターをオーバーコートしていないものをテラヘルツ域のフィルター等と組み合わせれば、高感度とまで言えないまでも手軽に測定できるようになるかと思えます。



出所:NRC

この種のテラヘルツ検出器の出現にはいくつかのまだクリアしなければならない問題があります。

一つは、テラヘルツ域でも感度のある常温マイクロボロメータの FPA を読み出しマルチプレクサーごと供給してくれるメーカーを探し出すこと。もう一つは、安価なテラヘルツ域の長波長域透過フィルターを供給してくれるメーカーを探し出すことです。高価な供給元は現在でも存在していますが、この価格帯では普及させるには高すぎます。常温マイクロボロメータの FPA は、高帯域に感度が有り過ぎるため、どのように常温背景雑音の高輝度波長域をカットするかによって、テラヘルツ域での計測への応用が具体化できます。

常温動作の検出器としては、他にパイロエレクトリック焦電素子、フォトドラッグ検出器、熱電対やゴーレイ検出器などがありますが、アレイや FPA で使えそうなのは TGS か LiTaO₃ の焦電素子くらいです。TGS や LiTaO₃ は、焦電素子としては DTGS より感度が低く、セラミックですので、多素子の FPA を量産するのは至難の業かと思われまます。焦電素子が高インピーダンスということも、後の信号処理を高速化できないという事情もあります。

最近も、高速で高感度な検出器はいろいろと開発されております。ニオブの超伝導ボロメータは、300GHz の応答速度までで、6~7 年ほど前に販売されましたが、歩留まりが悪く、製造を取り止め、現在は別のアプローチで開発が進められております。販売には、まだ数年掛かりそうです。もちろん、クライオジェン・フリーなボロメータも、現在の低振動パルスチューブ冷凍機に組み込んだ物も出てくると思います。

また、天文屋さんが使い始めている最先端の検出器は多々ありますが、ジョセフソン接合素子の開発から派生した STJ や TES 等も動作温度が低く、超低温でしか利用できません。一般用に応用するには、背景雑音に比べてずっと高感度・高分解能ですので、測定環境が極低温と同等な環境下でしか測定に使用できません。

今まで述べてきた検出器とは別に、近年テラヘルツ光源結晶等を使った検出器がいろいろ出現してきているようです。まだ市販されているものは知りませんが、これからが楽しみです。

以上が、テラヘルツ域を商売としている赤外線から長波長域を取り扱う商社からみた、今までの検出器の変遷と将来への期待です。

講義

時間領域テラヘルツ放射分光による伝導率スペクトルの決定法

東京大学生産技術研究所 平川一彦

1. はじめに

伝導率の測定は、半導体などの電子材料の評価のうちで最も基本となるものである。近年の時間領域テラヘルツ (THz) 分光法の進歩により、THz 電磁波の透過を測ることにより、ミリ波領域から THz 領域まで半導体ウェーハなどの伝導率スペクトルの決定ができるようになった。しかし、このような透過測定がいつも可能であるとは限らない。

一般に半導体には非常に高い電界(数 kV/cm~数百 kV/cm)が印加され、その状態で現れる様々な効果(たとえば Gunn 効果など)を利用してデバイスが作製される。従って、高い電界を印加した状態における伝導率スペクトルの情報が非常に重要となる。

しかし、もし通常の THz 透過測定を高い電界を印加した半導体に適用すると、どうなるであろうか? 容易に2つの問題があることに気づく;

(1) 透過測定には半導体にドーピングして、電子がいる状態にしておかなければならないが、THz 透過測定に必要な mm オーダーの試料に高い電圧を印加すると、非常に大きな電流が流れ、安定した測定が極めて困難になる。

(2) 多くの半導体がそうであるように、半導体が微分負性抵抗を示すと、高電界ドメインと呼ばれる内部電界が不均一な領域が発生し、均一な電界が印加されたときとは全く異なる伝導率を示すようになる。

これらの問題のため、通常の THz 透過測定は高い電界が印加されている半導体に適用するのは困難である。

2. 系の応答関数

この問題を解決するためには、時間分解 THz 放射分光法が極めて有効である。ご存じのように、ある物理量のスペクトルを測定したいとすると、周波数の関数としてその物理量の変化を測定するのが一般的である。しかし、線形応答を示す系の場合に、線形応答理論によれば、系にインパルス関数(またはステップ関数)を入力した場合の系の出力を見ることでも、同じ情報を得ることができる。

そこで、フェムト秒レーザーパルスにより半導体中にキャリアを励起する通常の時間領域 THz 分光測定がどのようなものか、ポンチ絵で見てみよう。図1は、時間領域 THz 分光法を時間を追って説明したものである。通常の測定では、電界を印加した半導体にフェムト秒光パルスを照射し、キャリアを生成する。この光励起キャリアはすかさず加速され、その加速度に比例した THz 電磁波を放射する。

ここで試行的に、電界のない状態で、光パルスを照射し、その直後にステップ的な電界を印加するような思考実験を行ってみよう。そうすると、同様にキャリアは加速され、THz 電磁波が放射される。このとき、本当の実験の場合(図1(上))も仮想実験の場合(図1(下))も、最終的な THz 放射の状態は第一近似としては同じと見なせる。このことは、時間領域 THz 放射実験が、系のステップ応答を測定していることに他ならず、放射される THz 電磁波は系のステップ応答として期待されるものと同じであることを示している[1]。

これを極簡単に定式化する。まず系にステップ関数的な電界を印加するために、電界を

$$F(t) = F\theta(t) \quad (1)$$

と表す。ここでラプラス変換を導入すると、印加電界は

$$\tilde{F}(s) = \frac{F}{s} \quad (2)$$

と表される。この電界により系に流れる電流は、

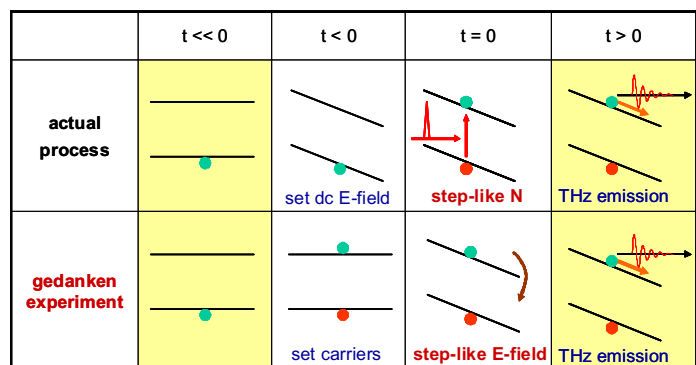


図1 時間領域 THz 放射測定 の概念図

(上) 通常行われる実験の過程を示したもの

(下) 電界の印加とパルス照射の順序を逆にした下層実験の概念図

$$\tilde{J}(s) = \tilde{\sigma}(s)\tilde{F}(s) \quad (3)$$

で与えられる。 \cdot は系の伝導率である。一般に、THz 放射は流れる電流の時間微分で与えられるので、

$$E_{THz}(t) \propto \frac{\partial J(t)}{\partial t} = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{+i\infty} s e^{ts} \tilde{\sigma}(s) \frac{F}{s} ds = \sigma(t)F \quad (4)$$

を得る[2]。

このことは、放射される THz スペクトルが系の時間領域の伝導率に比例しており、THz 放射の波形のフーリエ変換を行い、それをバイアス電界 F で割ったものが、求めたい伝導率スペクトル $\cdot(\cdot)$ になることを意味している。時間領域 THz 分光の特徴では、放射 THz 電磁波を位相まで含めて測定できるので、フーリエスペクトルの実部、虚部はそれぞれ伝導率スペクトルの実部、虚部を与える。

3. 半導体超格子中のブロッホ振動の場合

この手法を用いて半導体超格子中でブロッホ振動する電子の伝導率を決定してみよう。図2は、時間領域 THz 分光法で測定された半導体超格子中をブロッホ振動する電子が放射する THz 時間波形を示したものである。紙面の都合でブロッホ振動そのものについて説明することはできないが、印加電界が増加するに従って、短い周期で電子が振動的に伝導していることがわかる。

この波形に上記の手法を適用して解析したのが図3である。図3(a)は伝導率の実部スペクトルに対応し、図3(b)は伝導率の虚部である。通常のサブバンド間遷移と異なり、伝導率の実部が分散的なスペクトルを示し、虚部の方がローレンツ型のスペクトルを有していることがわかる。超格子内でブロッホ振動する電子の伝導率を測定しようとする試みは、1970 年の江崎らの提案[3]以来、多くの研究者が試みて、失敗してきた。その多くが伝導率を周波数の関数で測定しようとしたものである。ところが、時間領域 THz 放射測定により THz 電磁波形を測定することにより、あっという間に伝導率スペクトルの実部・虚部が測れてしまうと言うところが、本測定法のユニークな点である。

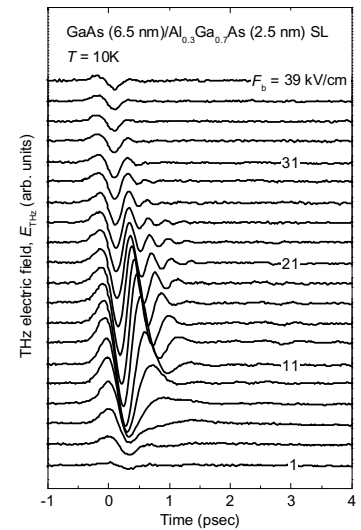


図2 時間領域 THz 分光法で測定された半導体超格子中をブロッホ振動する電子が放射する THz 時間波形

参考文献

- [1] Y. Shimada, K. Hirakawa, M. Odnoblioudov, and K. A. Chao, Phys. Rev. Lett. **90**, 46806 (2003).
 [2] N. Sekine and K. Hirakawa, Phys. Rev. Lett. **94**, 057408 (2005).
 [3] L. Esaki and R. Tsu, IBM J. Res. Dev. **14**, 61 (1970).

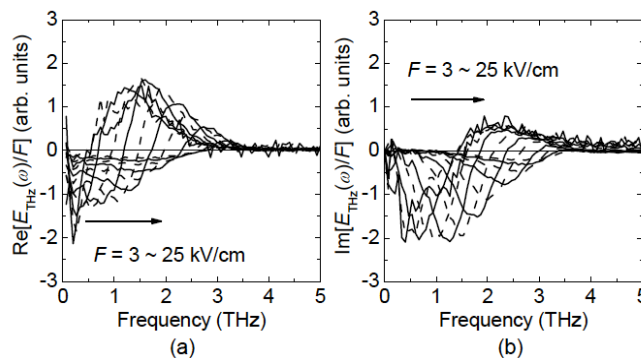


図3 図2の波形をフーリエ変換して求めたブロッホ振動電子の伝導率スペクトル。(a): 実部、(b): 虚部

研究室紹介

(独)情報通信研究機構 新世代ネットワーク研究センター 先端 ICT デバイスグループ テラヘルツプロジェクト(神戸研究所)

- Terahertz Project (Kobe) -

<http://www2.nict.go.jp/w/w113/thz/jp/main.html>

独立行政法人情報通信研究機構(NICT)のテラヘルツグループ(神戸研究所)は、1989年の通信総合研究所関西支所(現在では神戸研究所)(*)設立初期から第三特別研究室として発足した研究グループであり、現在では東京都小金井市にある本部の先端ICTデバイスグループテラヘルツプロジェクトの一員として、密接に連携してテラヘルツ波の利活用に関する研究を進めている。

当テラヘルツグループは、設立の経緯から関西地区の各大学との共同研究開発が盛んであり、レーザー技術と試料作成技術を駆使した半導体や超伝導体からのテラヘルツ波放射やテラヘルツ波帯に位置するコヒーレントフォノンの励起の研究開発、イメージング技術開発等を行って来た。一方、物質の指紋スペクトルが存在すると言われるテラヘルツ波帯の分光研究において、広い周波数領域からの情報を得ることは、精度、確度の高い分析のために重要である。関西でのグループ立ち上げ初期から連続と積み重ねられた実験知識、技術開発をもとに低温成長GaAs基板を利用した光伝導素子によるテラヘルツ波検出では、超広帯域検出にも世界で初めて成功した。

この結果をもとに10フェムト(10^{-14})秒のパルス光が出力される超短パルスレーザーを用いて広帯域テラヘルツ波センシングシステムを制作し、実用に供するに至った(下図)。水蒸気の影響を避けるためにテラヘルツ波発生、検出部は真空密閉が行われ、試料室を窒素パージすることが可能であり、現在15THzまでの測定が可能となっている。

これまでの研究を様々な形でご支援いただいたグループのメンバー、共同研究者の方々に、この場を借りてお礼申し上げます。

(情報通信研究機構 齊藤伸吾)

(*)神戸研究所は兵庫県神戸市と明石市とにまたがって位置し、ナノICTグループ、バイオICTグループを中心に、自然に恵まれた研究環境のもと、情報通信のための基礎研究を行っている。



テラヘルツ関連会議案内

<CLEO/QELS 2008>

2008年のレーザー・電気光学の国際会議、量子エレクトロニクスおよびレーザー科学会議(CLEO/QELS)は、5月4日から9日まで米国カリフォルニア州のサンノゼコンベンションセンターにおいて開催された。会議名称に現される通り極めて広範な光量子科学技術を対象とした最も権威のある最大規模の会議の一つとして認知されており、テラヘルツ技術に関する講演件数は、ポスター講演35件を含め、180件を超えており、光産業におけるテラヘルツ技術の注目の高さが覗かれる。

ここでは全ての講演について網羅できないが、印象に残った講演について紹介する。量子カスケードレーザー(QCL)の技術革新が続いている。E.H. Linfield と F. Capasso らのグループから 2.7THz 178K 動作の QCL 開発の報告があり、高温動作記録が更新された。出力は金属導波路で、クラッド層を金から銅に置換して THz 帯での損失を軽減している。一方、J. Faist らのグループからは中赤外 2 波長 QCL からの 5THz 差周波発生の報告があった(CMFF6)。中赤外 QCL が室温動作可能であり、かつ非線形光学効果の温度依存性が弱いことに着目し、常温 THz 光源としての可能性を彼らが昨年 Nature Photonics に提案したもので、本報告では 250K で 200nW の出力を得ている。今後の高出力・高温動作が期待される。また、半導体デバイスによるテラヘルツ検出・放射に関するセッション(CTuX)が今年初めて設けられたが、GaAs 系電界効果型トランジスタにおけるプラズモン共鳴を利用した室温下でのテラヘルツ波の発生(筆者らのグループ:CTuX2)と検出(C. Gossard らのグループ: CTuX3)の報告があり、今後のシステム応用が期待される。(東北大学 尾辻泰一)

<2008 分析展 JAIMA コンファレンスセミナー>

テラテクフォーラムは、2008年9月3日(水)13:00~17:00、幕張メッセ国際会議場コンベンションホールにおいて「安心・安全な社会に貢献するテラヘルツ技術」と題した技術セミナーを開催し、64名の参加(セミナー会場受付での登録者数)があった。

前半は「危険物発見技術の最前線」と称する特別セッションを企画した。まず東京大学の越光男先生より「テロ対策のための爆発物検出・処理統合システムの開発」という題目で、空港や鉄道駅でのテロ対策に向け、質量分析・ミリ波イメージング・中性子による元素分析を統合化した爆薬物の高感度・高速検出システムと、発見された爆発物をその場で安全に処理するための装置に関する研究成果が紹介された。次に、大阪大学の糸崎秀夫先生のグループより、核四極共鳴(NQR)を利用した爆発物・不正薬物の検出技術の開発状況が述べられた。最後に、福井大学の山本晃司先生よりテラヘルツ時間領域分光(TDS)法を用いて爆発物を検出する試みが説明された。

後半では、まず情報通信研究機構(NICT)の寶迫巖氏より NICT におけるテラヘルツ波を利用した安心・安全技術に関するプロジェクトについての講演があり、中でもテラヘルツ量子カスケードレーザとテラヘルツカメラを組み合わせた、最新のリアルタイムイメージング技術が注目された。次に、東

北大学の小川雄一先生より、昨今の食の安全に対するニーズに応えるものとして、テラヘルツ波分光・イメージングが異物検査や異種の粉の混入検査などに適用可能であることが多くの実験例を交えて紹介された。最後に、理化学研究所の大谷知行氏より、郵便物に隠された麻薬などの禁止薬物を非開封でスクリーニングし、さらにその薬物の種類を同定するシステムに関する講演があった。

今後も本フォーラムは、テラヘルツテクノロジーを産業界へ広く普及していくために、研究会やセミナーを通して最新の技術情報と技術者交流の場を提供していく予定である。 (大阪大学 永妻忠夫)

<日本分光学会第44回夏期セミナー>

9月3日～5日、日本分光学会第44回夏期セミナーが幕張メッセ国際会議場にて開催された。分光学会の夏期セミナーは毎年分析展と併設して開催しており、今年は例年よりも規模を拡大し3つのテーマ(「赤外分光法」,「テラヘルツ分光のための基礎技術・手法を学ぶ」,「近赤外分光法」)で三日間にわたる企画であった。以下、「テラヘルツ分光のための基礎技術・手法を学ぶ」について報告する。

最初の講演は「テラヘルツ分光のための基礎」と題する富山大学の松島房和先生の講演で、テラヘルツ帯の高分解分光の基礎およびテラヘルツ帯で利用されるレーザー光源を中心に実例を交えて平易にテラヘルツ分光の基礎についてお話しいただいた。次にブルカー・オプティクス社の笹倉大督氏より「テラヘルツ分光装置の選び方」という演題で、装置メーカーの立場で目的に応じたテラヘルツ分光装置の選び方のポイントや遠赤外フーリエ分光器とテラヘルツ時間領域分光器の特性の違いなどについてユーモアのある語り口で講演いただいた。

お昼休みをはさんで大阪大学の萩行正憲先生より「はじめてのテラヘルツ分光測定法」と題して、テラヘルツ分光法の歴史的な流れ、新しく出現したテラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)のインパクトとその原理、透過型・反射型 THz-TDS, テラヘルツエリプソメトリーについて応用事例を交えて講演いただいた。

スペクトルデザインの深澤亮一氏からは「テラヘルツ分光の使い道」と題して、赤外域も含めた様々な応用の可能性や、欧米および日本国内におけるテラヘルツ分光器の開発状況、具体的な応用例等をお話しいただいた。

キャノンの尾内敏彦氏からは「テラヘルツ分光の使い道～医療応用のためのセンシング」と題してマイクロフィルタメンブレインを用いた DNA, タンパク質, ホルモン・神経伝達物質, 食品添加物等の生体分子の THz-TDS による微量測定, マイクロストリップ線路を用いた On-chip のテラヘルツ分光分析デバイス, THz パルスを用いたトモグラフィックイメージング等についてご講演をいただいた。

東北大学の川添良幸先生からは「テラヘルツ振動の計算方法」と題して、第一原理計算の一般論、計算において注意しなければならないこと、テラヘルツ帯の分子結晶振動モードの第一原理計算の現状と最近の進歩について実例を交えてご講演いただいた。

最後にこのような素晴らしいセミナーを企画・開催していただいた小川雄一先生(東北大学)をはじめとする分光学会関係者の方々、講師の方々に感謝したい。(福井大学 谷 正彦)

<IRMMW-THz2008>

第 33 回赤外ミリ波・第 16 回テラヘルツエレクトロニクス合同国際会議(IRMMW-THz2008)は、米国 Pasadena において 9 月 15 日から 9 月 19 日までの 5 日間の日程で、多くのノーベル賞学者を輩出しているカリフォルニア工科大学(Caltech)を会場として開催された。

会議はプレナリー講演、セッション毎のキーノート講演、一般講演、及びポスター発表を合わせて約 500 件の発表があり、議長の Peter Siegel 教授の見事な運営で円滑かつ効果的に進められた。同氏の強い意向もあり、"THz for Life" のテーマの下、医学、天文学など広い分野からの話題が取り上げられ、境界領域で進行している最先端をうかがい知ることができた。異色なものとして、ダビンチの研究で有名な Maurizio Seracini カリフォルニア大学サンディエゴ校教授による文化遺産の科学調査のプレナリー講演と、それに呼応する福永香情報通信研究機構主任研究員のテラヘルツイメージングによる絵画の研究に関するキーノート講演が関心を呼んでいた。

テラヘルツ波発生・検出、分光などに関わる技術、基礎科学の報告は、従来通り数多く活発に行われた。実用という観点からは、昨今、空港でのセキュリティーチェックなど安心安全への応用の期待が高まっているイメージングにおいて、ドイツ FGAN-FHR のグループや会議議長 Siegel 氏の研究室が進めているサブテラヘルツ域レーダーの研究が着実な進展を見せているとの声が聞かれた。

レセプションは恒例?の博物館で行われ、夜間に館内を見学できた。また、最終日には NASA のジェット推進研究所へのツアーも行われたようである。なお、来年は韓国の釜山で開催される。隣国として、奮っての参加が期待されている。
(大阪大学 芦田昌明)

<国際会議予定>

OTST 2009 (International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2009)

March 07-11, 2009, Fess Parker's DoubleTree Resort, Santa Barbara, CA, USA

<http://conference.iqcd.ucsb.edu/OTST/index.php>

2009 MRS Spring Meeting

April 13-17, 2009, San Francisco, CA, USA

http://www.mrs.org/s_mrs/sec.asp?CID=10891&DID=201200

テラヘルツテクノロジーフォーラム通信 Vol.6 No.1 500 部 無料

発行日 2008 年 11 月 30 日

企画・編集 田中 耕一郎 (京都大学大学院理学研究科/物質-細胞統合システム拠点)

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>