



Ciência de terahertz: instrumentação e pesquisa na USP

Nicolas M. Kawahala, Felix G. G. Hernandez
Instituto de Física, Universidade de São Paulo
felixggh@if.usp.br

RESUMO: A ciência de terahertz tem ganhado destaque global com as possibilidades poderosas oferecidas por técnicas que combinam espectroscopia de baixa energia e imageamento não invasivo. Com fótons de energia da ordem dos mili-elétron-volts, a radiação terahertz se constitui uma plataforma ideal para sondar excitações fundamentais em sistemas de matéria condensada. Esse artigo aborda os avanços em infraestrutura e pesquisa de terahertz na Universidade de São Paulo, com destaque para a consolidação de um sistema de espectroscopia de terahertz no domínio do tempo. Essa montagem tem permitido estudos robustos sobre dinâmica eletrônica e de rede, além de aplicações em polarimetria, ampliando o entendimento de fenômenos emergentes em materiais quânticos. São discutidas uma visão geral e perspectivas.

Palavras-chave: Espectroscopia. Materiais quânticos. Terahertz.

ABSTRACT: Terahertz science has gained global prominence due to the powerful possibilities offered by techniques that combine low-energy spectroscopy with non-invasive imaging. With photon energies in the order of milli-electron-volts, terahertz radiation provides an ideal platform for probing fundamental excitations in condensed matter systems. This article presents the advances in terahertz infrastructure and research at the University of Sao Paulo, highlighting the consolidation of a terahertz time-domain spectroscopy system. This setup has enabled robust studies of electronic and lattice dynamics, as well as applications in terahertz polarimetry, enhancing the understanding of emerging phenomena in quantum materials. An overview and future perspectives are discussed.

Keywords: Spectroscopy. Quantum materials. Terahertz.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.16617763>



INTRODUÇÃO

A luz nos permite investigar o mundo sem contato direto, revelando desde propriedades visíveis até características ocultas na estrutura íntima da matéria. Essa capacidade se expande quando percebemos que a luz visível é apenas uma pequena fração de um vasto espectro eletromagnético, que se estende desde as ondas de rádio aos raios gama – cada frequência interagindo com a matéria de uma forma específica. É justamente essa assinatura única de interações que as técnicas de espectroscopia ajudam a decifrar através de fenômenos como absorção seletiva, emissão característica e espalhamento coerente. Dominar essas técnicas, no entanto, exige um controle preciso sobre a emissão, manipulação e detecção de radiação eletromagnética.

O espectro eletromagnético é marcado por uma importante fronteira tecnológica entre os domínios da eletrônica e da óptica, o que impôs um desafio histórico: enquanto micro-ondas (<300 GHz) são geradas e detectadas por osciladores eletrônicos, o infravermelho (>30 THz) demanda métodos ópticos tradicionais. Assim, a chamada lacuna do terahertz (0,3 – 30 THz) permaneceu por décadas como a última fronteira inexplorada do espectro, devido à incompatibilidade entre as técnicas. Contudo, essa faixa atrai considerável interesse por abrigar uma rica variedade de fenômenos cruciais para o estudo de sistemas físicos, químicos e biológicos.

Impulsionado pelo advento da espectroscopia de terahertz no domínio do tempo (THz-TDS) no fim da década de 1980, um desenvolvimento tecnológico acelerado reduziu drasticamente essa lacuna nas últimas décadas. A introdução de novos paradigmas eletro-ópticos – desde antenas fotocondutoras a cristais não lineares – alçou a ciência e tecnologia do terahertz a um patamar comparável em maturidade às regiões espectrais adjacentes. Hoje, a THz-TDS consolida-se globalmente como uma técnica poderosa que permite uma combinação única de espectroscopia de alta precisão com imageamento não destrutivo.

Esse artigo apresenta uma introdução concisa aos fundamentos da ciência de terahertz. Destacamos resultados experimentais robustos obtidos com a infraestrutura implementada pelo Grupo de Ciência, Tecnologia e Inovação em Terahertz (GCTI-THz) da USP (<http://portal.if.usp.br/terahertz>) [1], além de perspectivas futuras.

A BANDA DO TERAHERTZ

A banda do terahertz é comumente definida como a faixa espectral entre 0,1 e 10 THz (comprimentos de onda de 3 mm a 30 μm), embora alguns autores considerem a extensão até 30 THz (10 μm) para incluir excitações moleculares específicas. Como mostra a figura 1, essa região ocupa uma posição estratégica no espectro eletromagnético, combinando a capacidade de penetração não-ionizante típica das micro-ondas com a resolução espectroscópica do infravermelho. O alto contraste de interação com diferentes materiais – a radiação terahertz atravessa eficientemente a maioria dos dielétricos, mas é absorvida por moléculas polares como a água e refletida por metais – abre possibilidades únicas para imageamento não invasivo, com aplicações que vão desde diagnósticos médicos até controle de qualidade em processos industriais.

Como ferramenta para a investigação de materiais, a radiação terahertz destaca-se por seus fótons com energia da ordem de poucos mili-elétron-volts (meV), ideal para sondar excitações fundamentais em sistemas de matéria condensada. Técnicas de espectroscopia terahertz têm sido empregadas para estudar fenômenos quânticos emergentes, como modos coletivos em materiais topológicos e dinâmicas de rede cristalina envolvendo fônons. Também permitem explorar excitações eletrônicas como éxcitons e plásmons, contribuindo para o avanço no entendimento dos chamados materiais quânticos.

Métodos eficientes de geração e detecção de pulsos de radiação terahertz de banda larga são essenciais para a implementação de técnicas experimentais como a THz-TDS. Uma das abordagens mais comuns envolve processos eletro-ópticos em antenas fotocondutoras (PCA). Essas antenas consistem em um dipolo metálico depositado sobre

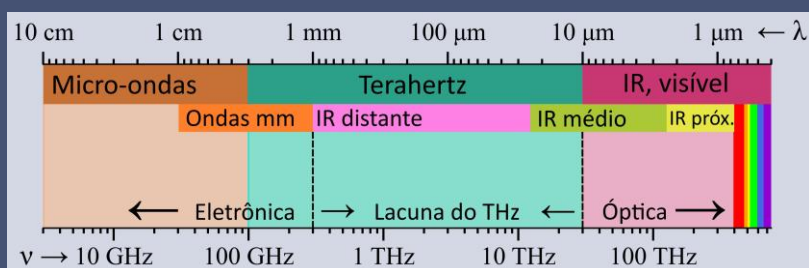


FIGURA 1 – Ilustração das regiões do espectro eletromagnético em torno da banda do terahertz. A escala superior está representada em termos do comprimento de onda, enquanto a inferior mostra as correspondentes unidades de frequência.



um substrato semiconductor. Quando expostas a um feixe de laser ultracurto, elas geram uma dinâmica de aceleração de fotoportadores em uma escala temporal de femtossegundos (fs). Ao modular ativamente seu dipolo com uma tensão de aceleração, a PCA emite pulsos de terahertz de maneira similar a um oscilador de Hertz. Por outro lado, uma PCA também pode ser utilizada para sondar pulsos de terahertz emitidos por uma fonte externa. Nesse caso, não se aplica uma tensão de polarização, e o dipolo metálico responde diretamente ao campo elétrico do pulso incidente, gerando uma fotocorrente proporcional à amplitude instantânea do campo.

O paradigma eletro-óptico de detecção de pulsos de terahertz tem implicações profundas no princípio de operação de um espectrômetro de THz-TDS. Como dispositivos como as PCAs medem diretamente o campo elétrico do pulso incidente, a técnica permite recuperar simultaneamente informações de amplitude e fase – um diferencial importante em relação a métodos espectroscópicos tradicionais. Uma consequência poderosa é a possibilidade de determinar a permissividade e a condutividade elétricas complexas de materiais por meio de uma técnica inteiramente óptica, sem a necessidade de contatos elétricos.

ESPECTROSCOPIA DE TERAHERTZ NO DOMINIO DO TEMPO

As técnicas de espectroscopia podem ser divididas entre aquelas que analisam a radiação emitida espontaneamente pelo objeto de interesse (espectroscopia de emissão) e aquelas em que uma fonte externa ilumina o material, permitindo sua caracterização por meio da luz transmitida, refletida, espalhada, ou com polarização alterada (espectroscopia de absorção ou impedância). Inserida nessa segunda categoria, a THz-TDS constitui a base da infraestrutura experimental implementada no GCTI-THz/USP, que opera na configuração por transmissão. O princípio de funcionamento pode ser visualizado no esquema simplificado da figura 2 e será explicado em mais detalhe a seguir.

Pulsos ópticos com duração da ordem de fs são gerados por um laser ultracurto e divididos em dois caminhos ópticos distintos por meio de um divisor de feixe. Um desses caminhos conduz os pulsos que irão excitar o dispositivo emissor de terahertz

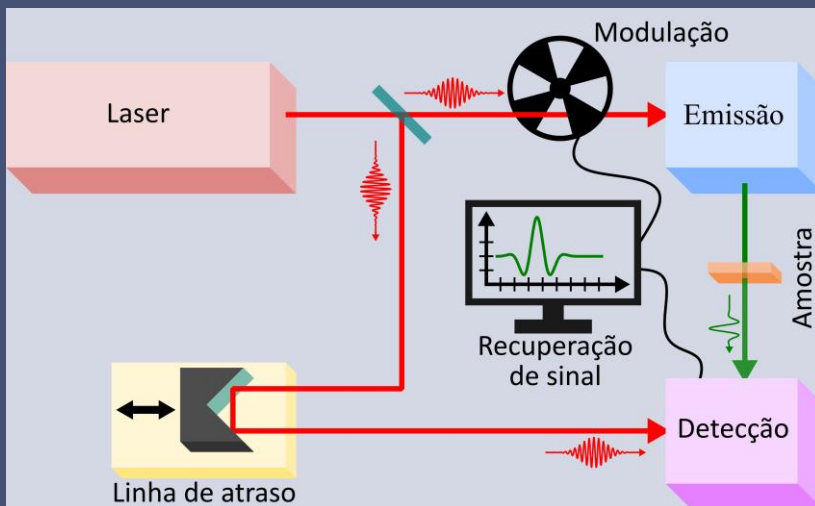


FIGURA 2 – Esquema simplificado de uma montagem experimental para medidas de THz-TDS em configuração de transmissão. Um laser de fs fornece pulsos ópticos que são divididos para bombear a emissão e acionar a detecção de pulsos de THz transmitidos por uma amostra. A recuperação do sinal depende de uma modulação na emissão, enquanto a resolução temporal é controlada por uma linha de atraso.

(como uma PCA), enquanto o outro direciona os pulsos que atuam como gatilho das medições no detector (que pode ser também outra PCA). Um terceiro percurso óptico encaminha os pulsos de terahertz gerados até o detector, atravessando uma amostra em seu trajeto. Como o pulso de terahertz é significativamente mais longo que o pulso óptico de gatilho, o controle do atraso entre eles – realizado por uma linha de atraso, ou seja, um estágio de translação que ajusta com precisão o comprimento de um dos caminhos ópticos – permite amostrar ponto a ponto o perfil temporal do campo elétrico do pulso de terahertz.

A partir do sinal medido no domínio do tempo, é possível obter o espectro de frequências que compõem o pulso de terahertz por meio de uma transformada de Fourier. Isso fornece acesso simultâneo à amplitude e à fase da radiação transmitida, permitindo a extração precisa de coeficientes ópticos como o índice de refração complexo. Essa grandeza está diretamente relacionada a propriedades eletrodinâmicas do material, como a função dielétrica e a condutividade elétrica em função da frequência, que podem então ser determinadas sem a necessidade de modelos ou relações adicionais. Para isso, a análise é geralmente realizada a partir da comparação entre medidas com e sem a amostra no caminho do feixe de terahertz, permitindo isolar o efeito da interação entre a radiação e o material.

INFRAESTRUTURA E RESULTADOS

A implementação de uma infraestrutura THz-TDS na USP surge como resposta à rápida expansão da ciência de terahertz no cenário internacional, impulsionada por avanços instrumentais e pelo crescente interesse em novas aplicações científicas e tecnológicas. Como um campo multidisciplinar de fronteira, a pesquisa em terahertz oferece amplas possibilidades de investigação em física da matéria condensada, caracterização de materiais funcionais, espectroscopia biomolecular, além de diagnósticos que auxiliam na restauração de obras de arte e no controle de qualidade industrial.

Nesse contexto, a montagem experimental consolidada nos últimos anos no GCTI-THz/USP conta com um sistema baseado em uma configuração de transmissão operada por PCAs, que tem demonstrado uma ótima relação sinal-ruído em uma faixa espectral de 0,1 THz a 2 THz. A infraestrutura é complementada por uma óptica dedicada ao regime de terahertz e por um criostato, permitindo medidas com resolução espacial milimétrica – próxima ao limite de difração nessa faixa espectral – em temperaturas que variam de 10 K a 300 K. Além disso, o uso de polarizadores específicos para terahertz viabiliza experimentos de polarimetria com alta precisão.

A implementação desse sistema de THz-TDS e os primeiros resultados obtidos estão cuidadosamente documentados em teses recentes defendidas no grupo [1–4]. O primeiro estudo conduzido com essa montagem envolveu a caracterização da permissividade terahertz de filmes epitaxiais de telureto de chumbo (PbTe), um material termoelétrico notável que vem despertando grande interesse devido às suas propriedades fonônicas [1, 5]. Mais recentemente, ligas desse composto com telureto de estanho (SnTe) – que exibem transições de fase topológicas e estruturais – vêm sendo investigadas por meio de medidas realizadas com o sistema de THz-TDS do GCTI-THz/USP [4, 6], possibilitando o estudo da interação entre as dinâmicas eletrônica e de rede. Além disso, o grupo mantém colaborações internacionais ativas em projetos que demonstraram a quiralidade de fônons em $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ sob campos magnéticos intensos [7, 8], bem como a formação de fônon–polaritons em cavidades ressonantes na faixa de terahertz [9].

Outro destaque da infraestrutura implementada tem sido a polarimetria terahertz aplicada ao estudo de minerais com ricas interações anisotrópicas de rede. Um exemplo expressivo é o clinocloro, um mineral lamelar abundante cujas ligações de van der Waals entre as camadas favorecem modos anisotrópicos de cisalhamento em baixa energia, que demonstraram grande potencial para a modelagem do estado de polarização de ondas terahertz [2, 10]. Ainda no campo do controle de polarização, um trabalho promissor com metamateriais ópticos para o terahertz envolveu a fabricação de cristais fotônicos de baixo custo impressos em 3D, altamente eficientes no funcionamento como placas de onda de banda estreita [3].

Atualmente, o GCTI-THz/USP também conta com um novo equipamento multiusuário (EMU), que amplia significativamente a capacidade experimental do laboratório. Trata-se de um sistema compacto de THz-TDS (TOPTICA *TeraFlash pro*), operando em uma faixa espectral mais ampla – de 0,1 a 6 THz – e habilitado para imageamento terahertz tanto em configuração de transmissão quanto de reflexão. Complementarmente, o grupo também dispõe de um laser amplificado – com uma energia de pulso de 1,2 mJ e taxa de repetição de 1 kHz – preparado para medidas com a técnica de bombeio óptico com sondagem terahertz (OPTH), que possibilita o estudo dinâmico de processos ultrarrápidos em materiais.



FIGURA 3 – Fotografia da infraestrutura experimental implementada pelo GCTI-THz/USP para medidas de THz-TDS, em geometria de transmissão. O sistema está preparado para experimentos em baixas temperaturas (acima de 10 K) e para medidas de polarimetria terahertz, operando em uma janela espectral de 0,1 a 2 THz, com uma resolução espacial milimétrica, próxima ao limite de difração nessa faixa espectral.



PERSPECTIVAS FUTURAS

O avanço da infraestrutura e da experiência acumulada pelo GCTI-THz projeta perspectivas promissoras para a ciência de terahertz na USP. As próximas etapas do grupo incluem a implementação de novos recursos experimentais que abrem possibilidades de exploração de fenômenos complexos. Um passo importante nessa direção será a incorporação de um sistema de bobinas supercondutoras, capazes de gerar campos magnéticos intensos em temperaturas inferiores a 10 K. Prevista para meados deste ano, essa nova capacidade permitirá a investigação de efeitos magneto-ópticos, transições de fase induzidas por campo magnético, propriedades topológicas, entre outros fenômenos emergentes.

Além da expansão instrumental, o grupo tem fortalecido parcerias tanto em âmbito nacional quanto internacional, com novas e continuadas colaborações que ampliam o escopo e o impacto das pesquisas desenvolvidas. Ao mesmo tempo, a atuação do GCTI-THz/USP tem contribuído diretamente para a formação de estudantes em diferentes níveis, promovendo a capacitação de pessoal altamente qualificado em instrumentação científica, caracterização de materiais e tecnologias associadas à banda do terahertz – um passo essencial para a consolidação dessa área.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos às agências de fomento FAPESP e CNPq pela concessão de diversos projetos de auxílio à pesquisa e bolsas de estudo.



REFERÊNCIAS

- [1] N. M. Kawahala. “Espectroscopia de terahertz no domínio do tempo: implementação, caracterização e aplicações”. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo (2023). doi: [10.11606/T.43.2023.tde-25052023-103743](https://doi.org/10.11606/T.43.2023.tde-25052023-103743).
- [2] D. A. Matos. “Absorção e efeitos da polarização de ondas terahertz no clinocloro”. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo (2023). doi: [10.11606/D.43.2023.tde-04092023-143205](https://doi.org/10.11606/D.43.2023.tde-04092023-143205).
- [3] G. F. Freitas. “Cristais fotônicos impressos em 3D para manipulação da polarização de ondas terahertz”. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo (2025). doi: [10.11606/D.43.2025.tde-29042025-161842](https://doi.org/10.11606/D.43.2025.tde-29042025-161842)
- [4] E. D. Stefanato. “Estudo da transição polar dependente da concentração de portadores de carga em filmes finos de $\text{Pb}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}\text{Te}$ dopados com bismuto”. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo (2025). doi: [10.11606/D.43.2025.tde-03052025-160145](https://doi.org/10.11606/D.43.2025.tde-03052025-160145)
- [5] N. M. Kawahala *et al.* “Thickness-Dependent Terahertz Permittivity of Epitaxially Grown PbTe Thin Films”. *Coatings* **13**, 1855 (2023). doi: [10.3390/coatings13111855](https://doi.org/10.3390/coatings13111855).
- [6] E. D. Stefanato *et al.* “Metallicity-driven polar transitions in topological epilayers”. *arXiv preprint arXiv:2503.21918 [cond-mat.mtrl-sci]* (2025). doi: [10.48550/arXiv.2503.21918](https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.21918).
- [7] A. Baydin *et al.* “Magnetic Control of Soft Chiral Phonons in PbTe”. *Phys. Rev. Lett.* **128**, 075901 (2022). doi: [10.1103/PhysRevLett.128.075901](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.075901).
- [8] F. G. G. Hernandez *et al.* “Observation of interplay between phonon chirality and electronic band topology”. *Sci. Adv.* **9**, eadj4074 (2023). doi: [10.1126/sciadv.adj4074](https://doi.org/10.1126/sciadv.adj4074).
- [9] A. Baydin *et al.* “Terahertz Cavity Phonon Polaritons in Lead Telluride in the Deep-Strong Coupling Regime”. *arXiv preprint arXiv:2501.10856 [physics.optics]* (2025). doi: [10.48550/arXiv.2501.10856](https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.10856)
- [10] N. M. Kawahala *et al.* “Shaping terahertz waves using anisotropic shear modes in a van der Waals mineral”. *npj 2D Mater Appl* **9**, 16 (2025). doi: [10.1038/s41699-025-00540-w](https://doi.org/10.1038/s41699-025-00540-w).