



第48回 極限コヒーレント光科学セミナー

2016年12月19日(月) 10:00~11:00

物性研本館 第一会議室

講師：嵐田雄介先生
東京大学

飛行時間型分析器を用いた高効率かつ高精度な 時間分解角度分解光電子分光

光励起された半導体の電子正孔系は非平衡かつ多体の量子力学を解明するための舞台の1つとして扱われてきた。低密度領域においてボーズ粒子系として振る舞う励起子ガスから、高密度領域においてフェルミ粒子系のように振る舞う電子正孔プラズマ、それらの相境界などが超短光パルスなどを用いて活発に調べられている。光を用いた測定では超高速領域の変化を観察できる一方で、光学スペクトルに現れる電子状態の情報は結合状態密度に制限される。

本研究では電子の状態密度と運動量分布、すなわちエネルギー分散関係をプローブする手段として角度分解光電子分光法を採用し、半導体電子正孔系の電子状態の解明を目指している。光電子分析器に飛行時間型角度分解分析器 (ARTOF) を採用し、これに最適化されたレーザーを組み合わせることで時間分解可能な角度分解光電子分光装置を開発した。

2次元運動量によるエネルギー分散関係を高効率な取得することが可能となり、かつ飛行時間型としては世界最高となるエネルギー分解能を達成している。現在は光励起した半導体の時間分解測定から低密度な電子正孔系の観察が可能となっている。当日はこれらについて紹介を行う。



第49回 極限コヒーレント光科学セミナー

2016年12月19日(月) 13:00~14:00

物性研本館 第一会議室

講師：樋口卓也先生

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Germany

光電場によるグラフェン中の電流制御

物質中の電子をどれだけ短時間の中に制御できるのか。これは物性研究の究極の問いの一つである。その限界に迫る試みが極短パルスレーザーを用いることで進められている。極短パルスレーザーを用いると次の2つの重要な性質を持った電場を生成することができる。1つは極短パルスではその尖頭値が大きくなるために非常に強い電場 (>1 V/nm)を比較的容易に生成でき、物質中で電子が感じている電場をも超える強さの電場を物質に印加できるということである。こういった強い電場が物質に加わると、ももとの系にあったエネルギースケール(例えばバンドギャップエネルギーなど)の逆数よりも短い時間スケールで電子が運動するようになる [1]。もう1つはキャリアエンベロープ位相(CEP)という位相を制御することで、電場波形の定まったパルスを生成できるという点である。この波形の制御は光の1サイクルの時間(例えば波長 800 nm の場合 2.7 fs)よりも短い精度で行うことができ、光のパルス幅よりもずっと短い時間スケールで印加する電場の強度を調整することができることを示している。

本講演ではこの高強度、かつ電場波形の制御された極短パルスレーザーを用いた電子制御の例として、グラフェン中にレーザー電場波形によって制御された電流を生成した結果[2]について発表する。一般に良導体に光を照射するとそのキャリアが電場をスクリーニングしてしまうために、良導体内の電子に強い光電場を印加することは難しい。しかしグラフェンは良导体であるもののキャリア密度が低く、また2次元的な形状を持つために、強い光電場をグラフェン中の電子に印加できる。そこでグラフェンのリボンに2サイクル、波長 800 nm のレーザーパルスを照射したところ、レーザーの電場波形を決める CEP に依存する電流がリボン中に流れることを発見した。特にリボンの向きに並行な直線偏光の場合、ピーク電場強度を 1 V/nm から 3 V/nm へと強めていくと、CEP に依存した電流の向きは反転した。そして円偏光の場合も CEP に依存した電流は観測されたものの、その向きは反転は観測されなかった。リボンに直交した偏光の場合にはこの電流は観測されなかった。これらの結果は、グラフェン中の電子を物質波として扱い、そのコヒーレントな運動を考えたモデルで良く説明できることを明らかにした。特に振動電場中で電子がグラフェンのディラック点近傍を何度か横切る際に起きる干渉効果 (Landau-Zener-Stückelberg 干渉) の有無によって、直線偏光照射と円偏光照射の質的な違いを説明できることが明らかになった。これらの結果は電子を光の1サイクルよりも短い時間で制御することが可能になったことで、電子を量子力学的でコヒーレントな波として扱う操作ができるということを示しており、光電場による物質制御や、物質のバンド構造の新たな決定法、そして光周波数で駆動できるエレクトロニクスデバイスといった広い展開が期待される。

[1] T. Higuchi, M. I. Stockman and P. Hommelhoff, “Strong-Field Perspective on High-Harmonic Radiation from Bulk Solids,” *Phys. Rev. Lett.* 113, 213901 (2014).

[2] T. Higuchi, C. Heide, K. Ullmann, H. B. Weber and P. Hommelhoff, “Light-field driven currents in graphene,” arXiv:1607.04198 (2016).



第50回 極限コヒーレント光科学セミナー

2016年12月19日(月) 16:00~17:00

物性研本館 第一会議室

講師：片山郁文先生
横浜国大院工

探針増強テラヘルツ電場による超高速電子制御

テラヘルツ領域には、強誘電ソフトモード、マグノン、超伝導ギャップ、プラズモンなど、巨視的な物性を特徴づける素励起が数多く存在し、物性研究に重要な周波数領域の一つとなっている。近年、これらの素励起を強励起することによる物質相制御や[1]、新物質相創出[2]、さらに電磁場と物質の強結合状態の検出[3]などの研究が盛んにおこなわれている。しかしながら、通常のテラヘルツ照射方法では、波長よりも短いスケールの構造は平均化されてしまうことから、誘起相の起源を特定したり、その物性を詳細に議論したりすることは困難であった。そこで我々は、電子状態の可視化も可能な走査型トンネル顕微鏡 (STM) とテラヘルツ分光法を組み合わせることで、テラヘルツ領域の情報をナノスケールで得る手法を開発し、それをを用いて物性を制御することを目指している。今回、予備的実験として STM の探針・グラファイト試料間に高強度テラヘルツ波を照射したところ、探針増強効果により 16 V/nm という巨大な電場が誘起され、直流電場では到達できない大電流が探針・試料間に流れること、その方向をテラヘルツ電場の極性で制御できることを明らかにしたので紹介する[4]。

実験では、パルス幅 100 fs、出力 2 mJ、繰り返し 1 kHz の Ti:sapphire 再生増幅レーザーを使用し、LiNbO₃ 結晶における光学整流効果を利用して高強度のテラヘルツ波を発生させた。このテラヘルツ波は、広帯域のモノサイクルパルスであり、電場の正側と負側が大きく異なる非対称な形をしている。このため、電場強度の強い側の極性で誘起されたトンネル電流を支配的に観測できるものと期待される。実際に、テラヘルツ波を STM に照射したところ、誘起電流の向きはテラヘルツの極性によって操作できることを見出した。誘起電流量は Simmons モデルを用いたシミュレーションで良く再現され、60,000 個にも及ぶ電子が、1 ps 程度の間にトンネルしていることが分かった。講演では、これらの研究を踏まえ、物性の制御などを含めて、今後どのような展開が期待されるかについても概観する。

[1] I. Katayama et al., Phys. Rev. Lett. **108**, 097401 (2012).

[2] R. Mankowsky et al., Nature **516**, 71 (2014).

[3] Y. H. Ynag et al., Science **342**, 453 (2013).

[4] K. Yoshioka et al., Nat. Photon., in press.