

原研遠赤外自由電子レーザーにおける高強度極短パルス特性

永井 良治¹、羽島 良一、西森 信行、菊澤 信宏、沢村 勝、峰原 英介

日本原子力研究所 光量子科学研究センター

自由電子レーザー研究グループ

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

概要

原研遠赤外自由電子レーザーにおいて高強度極短パルス光が生成されていることをパルス幅の計測により確認した。光共振器長を電子バンチ繰り返しと完全に同期した時に、最も短く強度の強いパルスを得ることができ波長 $22.5\ \mu\text{m}$ でパルス幅は $250\ \text{fs}$ であった。これは光の約3.7周期分に相当し自由電子レーザーで生成された最短のパルス光である。また、このときのパルス光のエネルギーは $100\ \mu\text{J}$ に成った。さらに、光共振器長と電子バンチ繰り返しの同期をずらしていくとサブパルスが現れてくる様子も観測された。最短のパルス幅、サブパルスの出現の様子ともに、数値シミュレーションの結果とよく一致していた。

1. 緒言

日本原子力研究所において、研究・開発が進められてきた超伝導加速器駆動型の遠赤外線領域の自由電子レーザー装置 (JAERI-FEL) で世界最高出力での発振が成された^[1]。その高効率・高出力の発振は、光共振器長と電子ビームの繰り返しと完全に同期した時に起こる持続的スーパーラディアンスとも呼ぶべき、新しいタイプの自由電子レーザー発振により成し得ていることが分かっている^[2]。

この発振状態での生成されるパルス光は非常に短い幅であるという結論を1次元の数値シミュレーションから得ている。また、定性的にも電子ビームから光へのエネルギー変換効率が非常に高いことから、パルス光の幅が非常に短いことが予測される。さらに、持続的スーパーラディアンス状態であるということは、発振が完全に飽和に達したのちでもパルスはサブパルスを持たないシングルパルスであるということである。以上のことを実験的に確認するために2次のオートコリレーションによるパルス幅の計測を行ったのでその結果について報告する。

2. パルス幅計測

JAERI-FEL における最大出力は可動スクレーパミラー型の出力結合器^[3]により光共振器から光を取出した時に得られているが、パルス幅を測定するオートコリレーターへ光を導く際のアライメントの容易さを考慮しセンターホール型の出力結合器により光共振器から光を取出した。光共振器から取り出され

る光の強度に差はあるが、電子ビームから光への変換効率が同じになる結合度であれば、どちらの出力結合器を用いても自由電子レーザーのパルス特性に差はない。また、空気中の水蒸気などによる光の分散によるパルス幅の広がりを最小にするため、オートコリレーターは加速器室の光共振器のすぐ側に設置され、大気中で計測が行われた。

2.1 非共軸型オートコリレーション

非共軸型オートコリレーション^[4]は図1のようにして行った。オートコリレーターに入射されたパルス光はマイラのスプリッターにより二つに分けられそれぞれレトロリフレクターで反射されパラボラミラーで集光され一点で交差する。一方のレトロリフレクターのみを光軸に平行に移動させ、二つに分けたパルス光のうち一方に遅延をつくり、この遅延時間によりパルス光の時間幅を計測する。このとき交差する点に置かれた厚さ $2\ \text{mm}$ のTe結晶により2次高

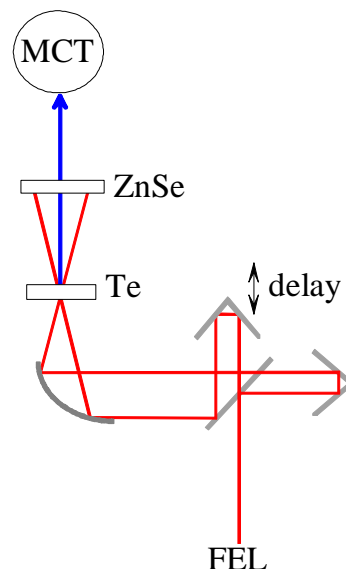


図1：非共軸型オートコリレーター

調波信号を発生する。その発生した2次高調波信号は二つの光路のちょうど中心で観測される。この方法の特徴のひとつは、パルス光が重なっていない時には検出器の位置では信号が観測されないので、バ

¹ E-mail: r_nagai@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

ックグラウンド光の信号が無く高い S/N で計測が可能であることである。もうひとつは、二つの光が斜めに交差するので横方向の広がりの中で平均化されてしまい波長ごとの干渉波形は現れないので、波長より長い間隔でスキャンでき広い範囲を早くスキャンすることが可能であることである。

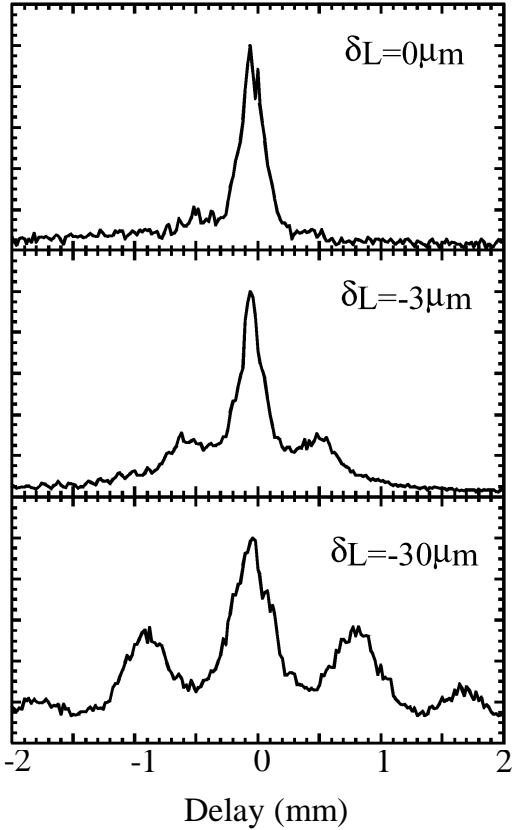


図 2 : 非共軸型によるパルス幅計測

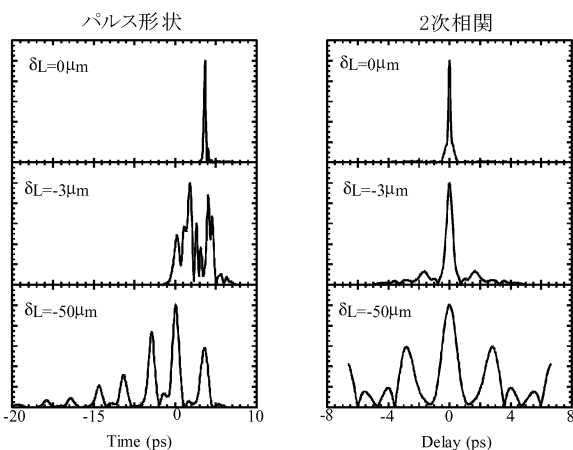


図 3 : 数値シミュレーションの結果

発生された 2 次高調波信号は MCT で検出され、自由電子レーザーが完全に飽和した後の 20 μs の間での平均値を出力信号とした。図 2 に計測結果を示す。上から順に光共振器のデチューニング距離が 0 μm、3 μm、30 μm の時の測定結果である。完全同期状態ではオートコリレーターの出力信号は中心のパルスのみでサテライトが観られないことから、このとき

の自由電子レーザーのパルスはシングルパルスであると言える。シングルパルスであるということは完全同期状態で発振していることの証拠でもある。また、スリップ長 (52 周期×22.5 μm=1.17 mm) ずれた位置で信号がないことから、電子ビームの幅はスリップ長以下であると言える。光共振器長の同期を外していくと電子ビームのスリッページのためにサブパルスが現れてくる。図 3 に数値シミュレーションの結果を示す。左側は横軸を時間軸としたときの完全に飽和した後のパルスの形状であり、右側はそのパルスの 2 次の自己相関である。数値シミュレーションでも、完全同期状態ではシングルパルスであり、同期を外していくとマルチパルス、バーストパルスと変化していく。この結果はと計測の結果と非常によく一致している。

2.2 共軸型オートコリレーション

共軸型オートコリレーション^[5]は図 4 のようにして行った。非共軸の場合と異なり、基本波の成分も検出器に入って来てしまうので ZnSe のフィルターを用いて基本波成分を除去した。非共軸型の場合には光の横方向の広がりがパルス幅の計測に影響を及ぼすので、波長の数倍程度の短いパルス幅を計測する時は十分な配慮が必要である。

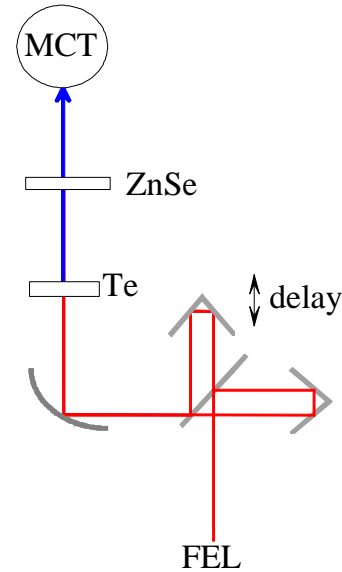


図 4 : 共軸型オートコリレーター

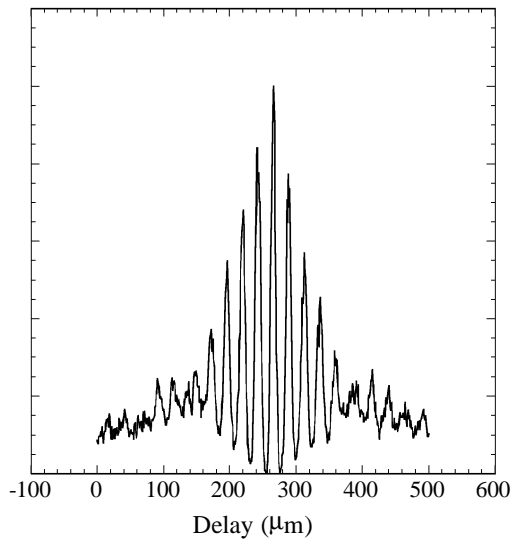


図5：共軸型によるパルス幅計測

一方、共軸型であればそのようなことは無く、光の干渉波形を観測することができるので、光パルスの詳細な情報を得ることが出来る。そこで、完全同期状態での詳細なパルス幅を計測するために、共軸型のオートコリレーターによりパルス幅の計測を行った。

その結果図5に示すように、時間幅 250 fs、光の周期にして約 3.7 周期分という非常に短いパルスが生成されていることが分かった。また、バックグラウンドの部分に僅かな盛り上がりが見られるが、これはスーパラディアンズ特有のバーナムチャイオ・リングングと呼ばれるリングングの影響である。この結果も数値シミュレーションの結果とよく一致してい

る。また、このときの 1 パルスあたりのエネルギーはパワーメータで観測された平均パワーから換算すると 100 μJ であった。

3. 結論

高効率・高出力発振を達成している JAERI-FEL において、パルス幅の測定を行ったところ光の周期にして約 3.7 周期という非常に短いパルスが完全同期状態で発生されていることが分かった。また、光共振器の同期を外していった時のパルスの振る舞いも数値シミュレーションとよく一致しており、JAERI-FEL で初めて成し得た完全同期状態発振を裏付けるものであった。

1 パルスあたりのエネルギーは今回の実験条件では 100 μJ であったが、可動スクレーパミラー型の出力結合器を用いた場合の最高出力時は 225 μJ でありその時のパルス幅も今回とほぼ同等と考えられるのでこのときのピーク出力は 0.9 GW に及ぶことになる。このような完全同期発振による高強度・極端パルスの生成は自由電子レーザーの利用分野を今後さらに広げるものと期待する。

参考文献

- [1] E. Minehara, et al.: Nucl. Instr. and Methods, A445, 183-186 (2000)
- [2] N. Nishimori, et al.: Phys. Rev. Lett., 86, 5707-5710 (2001)
- [3] R. Nagai, et al.: J. Nucl. Sci. and Tech., 38, 15-18 (2001)
- [4] 石田祐三: レーザー研究, 第 15 巻, 887-895 (1987)
- [5] 長沼和則: 光学, 第 22 巻, 762-768 (1993)