

研究紹介 - レーザー駆動スピーカー

連絡先: 国際基督教大学理学科 岡村秀樹 hokamura@icu.ac.jp

1. 目的および背景:

指向性が強く、遠距離でも減衰しにくいレーザー光は、遠隔に情報を伝送するために広く用いられている。音響信号を伝送する際、光を信号としてのみ用い実際にスピーカー等を駆動するためには別の電源を用いるのが通常の構成であるが、ここでは、外部からのエネルギー供給なしに、レーザー光のエネルギーだけによってスピーカーを駆動することが可能であるのか考察と実験を行なった。

レーザー光のみでスピーカーを鳴らすことができれば、電源供給の必要がなく、遠隔で鳴らすことができるため、移動体から音を出すような用途に好適であると考えられる。ディズニーランドなどの遊園地で軽いスピーカーを内蔵した小鳥が飛びながら、鳴き声を流すとか、模型飛行機に搭載し、空中からアナウンスや音楽を流すなどの応用がある。

イベントや式場でコードがなくてもレーザーの向きを調整するだけで音楽を鳴らすことができ、コンセントやコードにつながなくてもスピーカーを鳴らすことができるため設置が容易であること。遠距離にあるスピーカーを鳴らすことができる。コンセントがからまったり、景観が損なわれたりしない。レーザー光を妨げる障害物がない場所では、ほとんど環境に影響されずに使用可能である。高い木や、建物などの影になる場合でも、ミラーで反射させれば光を導くことは可能である。これらの特長を活かした応用としては、たとえば、災害時に停電した地域に遠隔からアナウンスを行なうようなシステムが考えられる。これだと、たとえば、電線や通信ケーブルが切断されていたとしても使用できる。

また、光伝送の特長である電磁波の影響を受けないという利点を持ちあわせているため、強磁場環境で使うことができる。また、長距離伝送では電氣的ノイズが問題になる場合も多いが、本システムではノイズの影響を受けない。また、太陽電池はシリコン製であり、電池も使用しないので環境負荷の小さいシステムであるということも利点である。

光ファイバーや他の伝送路にレーザー光を通す場合では問題はないが、自由空間で用いる際には、危険性がないように注意が必要である。

2. エネルギー的な考察:

Si 太陽電池の場合、エネルギー変換効率の最も高いものでも 25%程度であるが、これは太陽光に対しての値であり、レーザーのような単色光では波長によってはこれよりもはるかに高い効率で変換することができる。太陽光線のようなスペクトル幅の広い光源に対する変換効率があまり高くないのは、太陽電池はバンドギャップより小さいエネルギーの光は変換できず、また、バンドギャップより大きいエネルギーの光については、その余分のエネルギーは無駄になってしまうということと、太陽光のスペクトルのピークは 550nm 近辺であるが、Si 太陽電池の場合、波長 800nm 近辺が感度が最大であり、両者は一致しないという理由による。

スピーカーの効率は一般市販品で 3-7% である。システムで考えた場合のエネルギー効率は、太陽電池の変換効率とスピーカーの変換効率の積になるので、光エネルギーから音響エネルギーへの変換効率は、数%程度は期待される。数%の変換効率があるならば、100mW のレーザーに対し、音響パワーとして、数ミリワットは得られる可能性がある。現在、数ワットレベルのレーザーが一般に市販されており、100mW 程度のレーザーダイオードも安価に購入できる。

1 mW (90dBW)の音響パワーは、大声を出したときの音響パワーに相当する。通常の会話における音響パワーは、 $10 \mu\text{W}$ (70dBW)程度である。このことから、レーザー駆動のスピーカーで出力的には十分に実用的なシステムが構築できる可能性があると考えられる。

3. 実験

図1に示すような構成で実験を行なった。用いたスピーカーは直径 10cm のダイナミックスピーカー(インピーダンス 8Ω)で、これを直接、太陽電池の端子に接続した。太陽電池は、サイズが $62 \times 33 \text{mm}$ で、出力開放時の定格電圧 0.5V、短絡時の最大電流が 300mA のシリコン太陽電池モジュールを用いた。

光源には Q-sw Nd:YAG レーザーを用いた。波長は 1064nm、パルス幅は 10ns で、繰り返し周波数を 100Hz から 15kHz まで変化させた。15kHz 時のパワーは約 100mW であり、これは、1パルス当たりのエネルギーにして約 $7 \mu\text{J}$ に相当する。レーザー発振器と太陽電池の間の距離は約 2m であった。

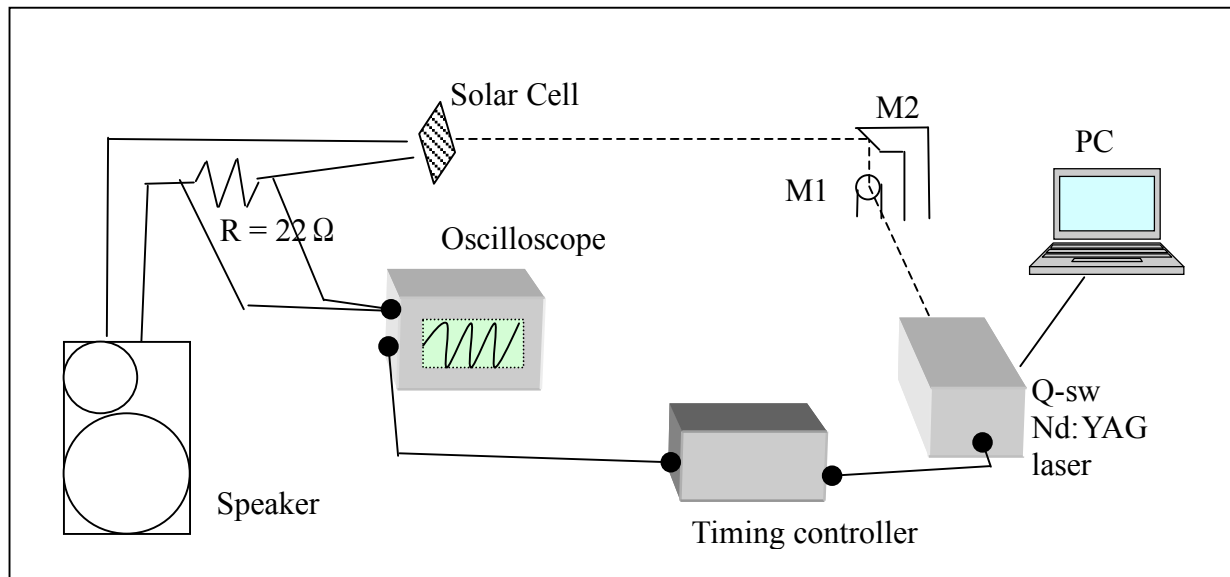
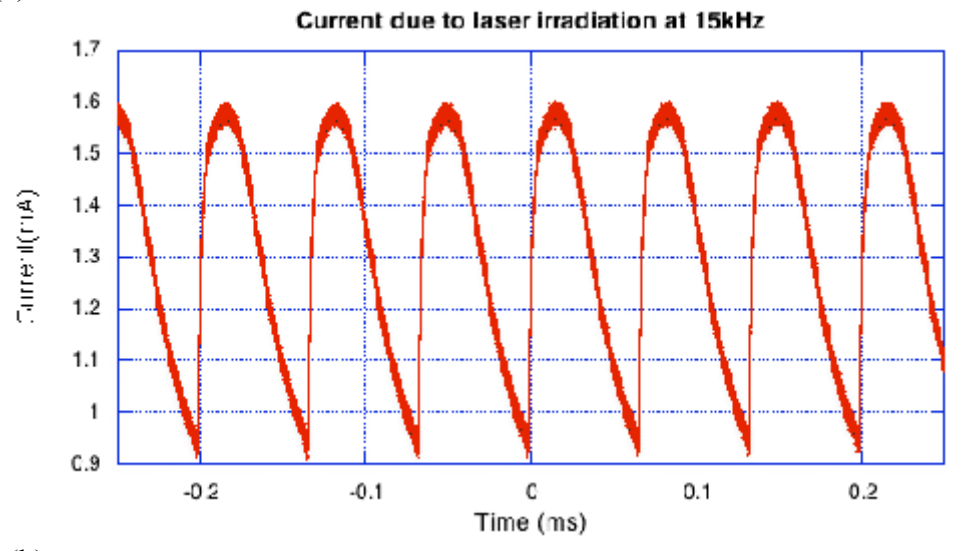


図1 実験配置図, M1, M2 はミラー, R は電流測定用の抵抗器

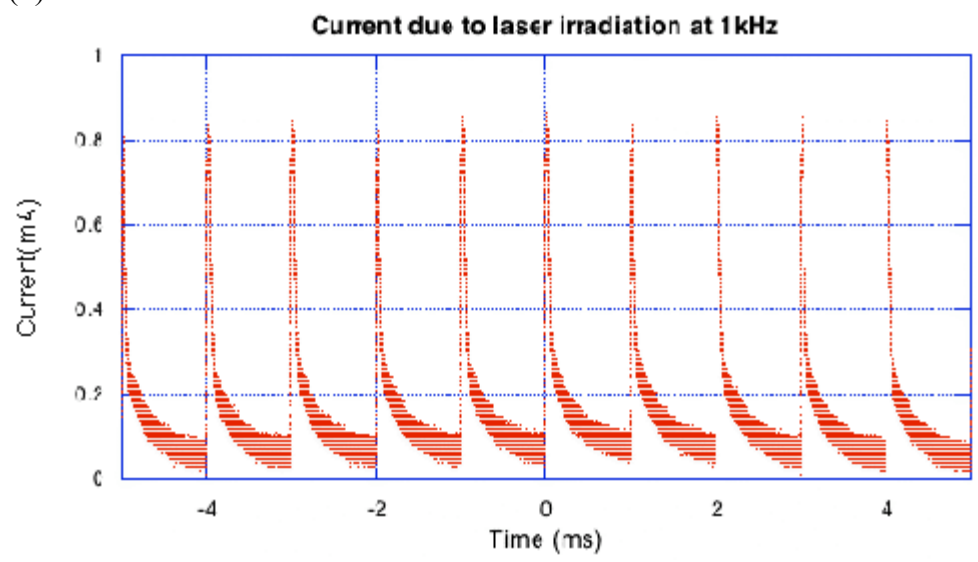
100Hz, 1kHz, 15kHz いずれの場合でも、スピーカーからはっきりとした音を聞くことができた。音の高さはレーザーの繰り返し周波数の変化に応じて変化した。15kHz の時、スピーカーからの出力は推定で音圧レベルで 50dB、音響インテンシティ(sound intensity) 10^{-7}W/m^2 。音響パワー(sound power)は約 $1 \mu\text{W}$ であった。

レーザーの平均パワーは 100mW だったので、光から音へのエネルギー変換効率は $10^{-5} = 0.001\%$ となる。今回の実験では太陽電池の感度の悪い波長であることと、スピーカーとのインピーダンス整合もしていないし、後述するがパルス光によって太陽電池が飽和し、エネルギーが無駄になっている可能性がある。したがって最適化によってこれより大幅に向上できる余地がある。図2にそれぞれの繰り返し周波数の時の、スピーカーに流れる電流を測定した結果を示す。

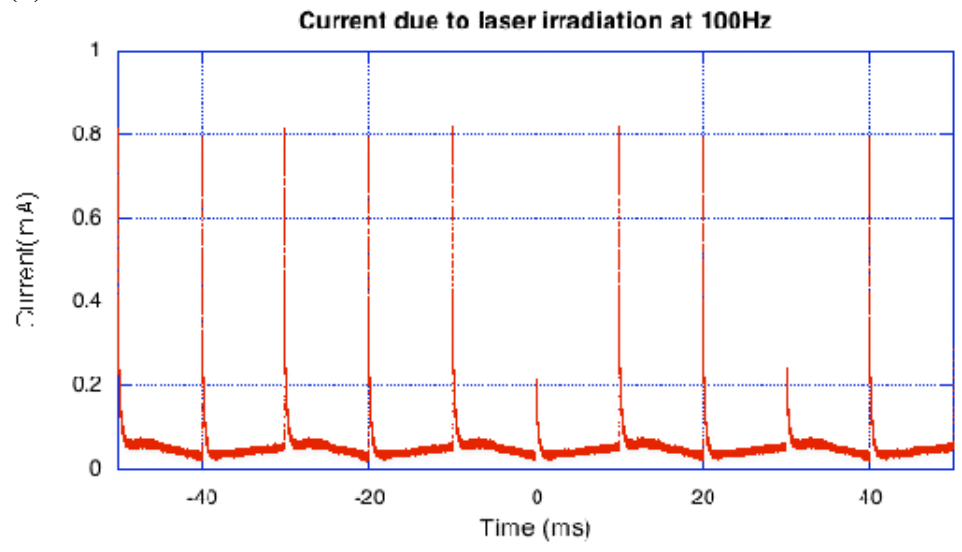
(a)



(b)



(c)



【図 2】レーザーの繰り返し周波数(a)15KHz, (b) 1kHz, (c) 100Hz の時のスピーカーに流れる電流の波形

4. ディスカッション

レーザー光の強度を $I(t)$ とする。光照射によって太陽電池の両端に $e(t)$ の電圧が生じる。太陽電池は数百 Hz の応答速度があるので、可聴域においては $e(t)$ は $I(t)$ にほぼ比例すると考えることにする。

スピーカーの回路は、インピーダンス 8Ω のコイルと考え図3のような回路を考える。 R は太陽電池の内部抵抗である。直列回路なので

$$e(t) = Ri(t) + L \frac{d}{dt} i(t)$$

となる。今、光パルスをも δ 関数で近似する。 $e(t) = A\delta(t)$ とおく。この近似は繰り返し周波数がパルス幅に対して十分に遅い場合に成り立ち、図2の(b), (c)ではこのような状況になっていると考えられる。この解は

$$i(t) = \frac{A}{L} \exp\left(-\frac{R}{L}t\right)U(t)$$

となる。 $U(t)$ は、ヘビサイドの単位ステップ関数 (Heaviside Unit Step Function) である。得られた解は、図4に示すように、光パルスの照射によって急激な立ち上がりの電流が回路に流れ、ゆるやかに緩和する、という挙動を示す。光の各パルス毎にこのような電流が流れ、これがパルスごとに繰り返される。

計算に用いた数値は以下の通りである。 L はインピーダンス 8Ω より、 $i\omega L = 8\Omega$ 、ここで $\omega = 2\pi \times 1\text{kHz}$ を用いて $L = 0.0013\text{H}$ となる。 R は短絡電流 300mA より、 1Ω と仮定した。

A は、 $A = \int_{-\infty}^{\infty} e(t)dt$ より決定される。パルス幅 10ns の間、 0.5V の電圧が発生すると考え、 $A = 10^{-9}\text{V}\cdot\text{s}$ とおいた。

計算で求められた緩和時間、約 2ms は実験結果とほぼ一致している。図2(b), (c)は、各パルスによる電流が独立していて、電流は各パルス間でゼロになる。また、電流のピーク値も(b), (c)間で差がない。一方、図2(a)では、電流値の最小が 0.9mA であり、緩和しきらないうちに次のパルスがきていることがわかる。(b), (c)に比べて(a)のピーク波形が丸いが、パルス幅は 10ns とこれより十分小さいのでこれはパルス波形を反映しているものではなく、システムの応答速度のためである。電流の積分値が (b)に比べて若干減少していることより太陽電池の飽和も起きている可能性がある。実験の範囲では、流れる電流は照射光にほぼ追従しており、可聴域では音響信号の伝達に問題がないことがわかる。

5. まとめ

レーザー光のエネルギーだけによってスピーカーを駆動し、実際に音をだすことが可能であることを示した。可聴域周波数で、再生が可能であることがわかった。エネルギー変換効率は、約 0.001% であったが、最適化によって数%に向上できる可能性がある。

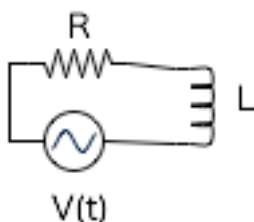


図3 等価回路

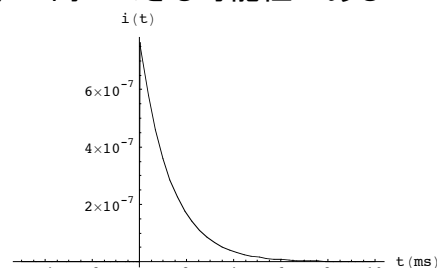


図4 δ 関数パルスに対する電流の計算結果