

CVD ダイヤモンドを用いた高出力 THz 光源の開発とその応用

電子工学科 米田研究室 永田広明

1 . 目的・概要

本研究では高強度テラヘルツ(THz)波を用いて、現在解明されていない非線形領域での相互作用について解明することを目的としている。これを達成するために高出力 THz 光源の開発と、THz 波発生・観測システムを構築した。

THz 周波数帯の電磁波は、80 年代にオーストンが光伝導素子からの発生に成功したのを皮切りに、多くの研究が行われるようになった。最近では、超短パルスレーザー技術が発達し、これをポンプ光として非線形光学結晶に入射させ THz 波を取り出す差周波法、半導体表面の準位を利用する方法、光伝導電流を用いる方法など様々な THz 波発生方法が研究されている。

本研究では、THz 波の放射源としては絶縁破壊強度が高いなどのすぐれたパラメータを持つ CVD ダイヤモンドを使用している。これまでのところ、有効放射面積 $10[\text{mm}^2]$ から、 $10^5[\text{V}/\text{cm}]$ の放射を実現している。これをさらに大きくして、非線形領域での相互作用を解明したい。

2 . THz 波放射源

THz 波の発生電界と光伝導特性の間には、次の関係がある。

$$E_{\text{THz}} = \frac{\sigma_s \eta_0}{(1 + \sqrt{\epsilon_r}) + \sigma_s \eta_0} E_b$$

E_b は印加電界、 σ_s は光伝導素子の面導電率、 η_0 は真空のインピーダンス、 ϵ_r は光伝導素子の比誘電率である。面導電率が上昇し、 $\sigma_s \eta_0$ 積が 1 に近づくと飽和を起すため、発生する THz 波の強度は E_b までしか得られない。したがって、放射 THz 波の電界強度を大きくするには印加電界 E_b を大きくしなければならない。

従来使用されてきた GaAs による放射源の場合は、最大印加電界は $10^4[\text{V}/\text{cm}]$ であった。ダイヤモンドではこれより 2 桁以上大きい電界を印加できる。現在のところ、膜厚 $12\mu\text{m}$ のダイヤモンド素子で $2 \times 10^6[\text{V}/\text{cm}]$ の印加まで得られている。

今回はダイヤモンドの膜厚を $12\mu\text{m}$ から $300\mu\text{m}$ に増して、電極間の容量を大きくすることで蓄積エネルギーを大きくし、放射 THz 波の強度を強めることを試みた。($12\mu\text{m}$ の素子に比べて高速で生成しているため純度を低くなっている) まず、この素子の THz 波放射源としての特性 (ドリフト速度 μ 、キャリア寿命 τ 、量子効率 η) について調べることにした。

膜圧	12 μm (NEC)	300 μm (Devious)
生成速度	1 $\mu\text{m/day}$	高速
純度	高	低
粒径	10 μm	100–250 μm

表 1 . 膜圧 12 μm と 300 μm のダイヤモンド比較

3 . システム

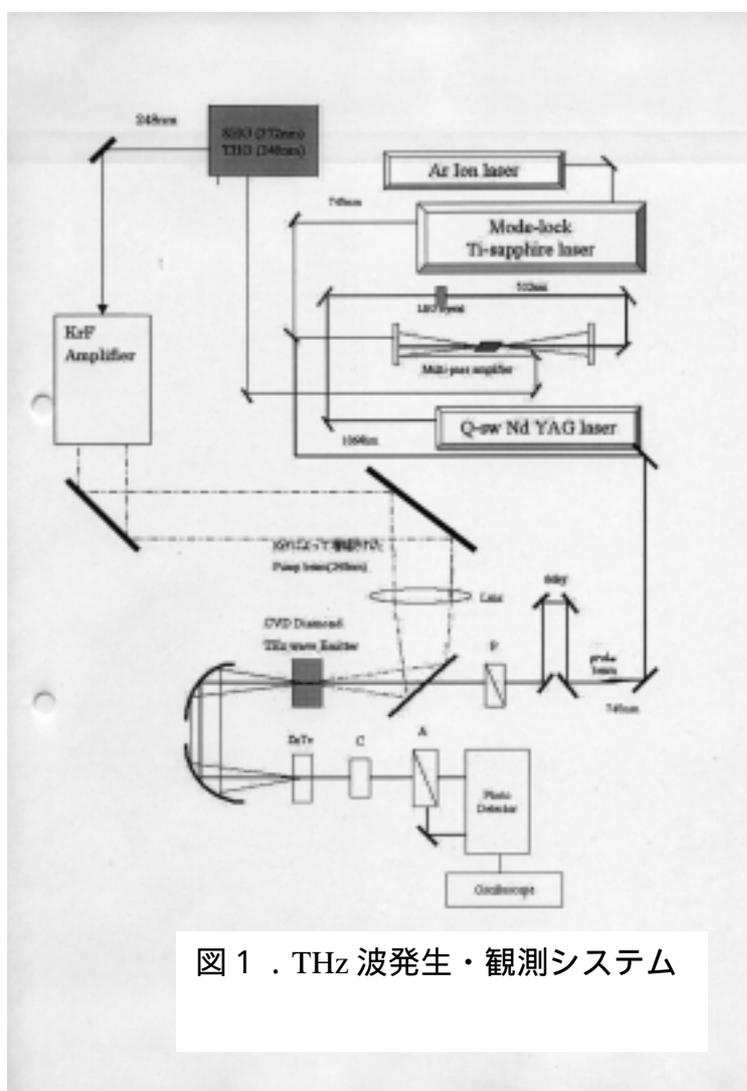


図 1 . THz 波発生・観測システム

ダイヤモンドの間接型バンドギャップに相等する波長は 220nm であり、これに近い波長で 20mJ 程度のポンプ光をダイヤモンドに入射して THz 波を発生し、ポンプ-プローブ計測により THz 波を検出する。

まず、アルゴンイオンレーザー励起 Kerr レンズモードロックチタンサファイアレーザー(745nm, 122fs, 82MHz, 6nJ)の第 3 高調波(248nm)を KrF で増幅し、20mJ のポンプ光をつくる。プローブ光は 745nm の光をそのまま用いる。

計測には THz 波とプローブ光との位相整合のよい ZnTe 結晶を使用する。

4 . CVD ダイアモンドの THz 波放射源としての特性

ダイヤモンド素子にオーミック接触のとれる銀ペーストにより電極を取り付ける。これに電界を印加し、ポンプ光を入射したときの光伝導特性について調べる。

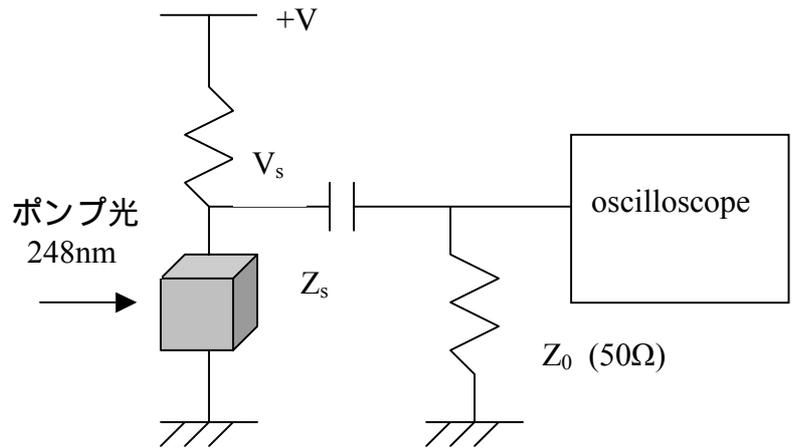


図 2 . 測定回路

4 . 1 ドリフト移動度

ダイヤモンドの印加電界 E を変化させて各々の電界値に対する光伝導電流密度 J の値を出力電圧（オシロスコプの読み値）から計算し、グラフにプロットする。結果は図 3 のようになる。

一般に E と J の間には $J = ne\mu E$ なる関係がある (n : 生成キャリア密度、 e : 電荷量)。ポンプ光のエネルギーが $12\text{mJ}/\text{cm}^2$ 、ダイヤモンドの吸収率が 0.6 、厚みが $300\mu\text{m}$ であることから n が求まり、図 3 から (E, J) の組み合わせを適当に選び上式に代入すると $\mu = 125\text{cm}^2/\text{Vs}$ と求まる。膜圧 $12\mu\text{m}$ のものでは $30\text{cm}^2/\text{Vs}$ であり、この値よりは大きくなっている。

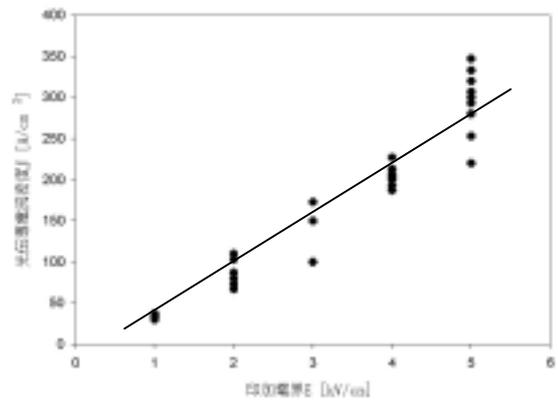


図 3 . 印加電界 E と光伝導電流密度 J の関係

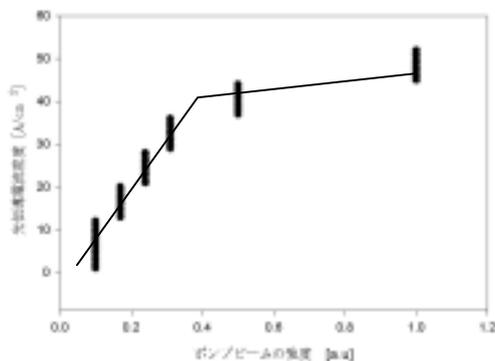


図 4 . ポンプ光の強度と光伝導電流密度 J の関係

4.2 キャリア寿命

印加電圧を一定(700V)にして、ダイヤモンドに入射するポンプ光の強度を変化させたとき、各々の値に対する光伝導電流密度 J の値を計算し、プロットしたのが図4である。ビーム強度を大きくすると、ダイヤモンドのインピーダンス Z_s が Z_0 程度に下がったところで J は飽和する。 $V_s = VZ_s / (Z_0 + Z_s)$ から、飽和したときの出力電圧は 350V となっている。一方、オシロスコープの出力波形は 35V, パルス幅 35ns であったから、実際のパルス幅は 350ps と考えられ、これがキャリア寿命となる。膜厚 12 μ m のものでは 80ps であったから、キャリア寿命についても膜厚を増すことで長くなった。

5. ZnTe による THz 波の最小検出感度の評価

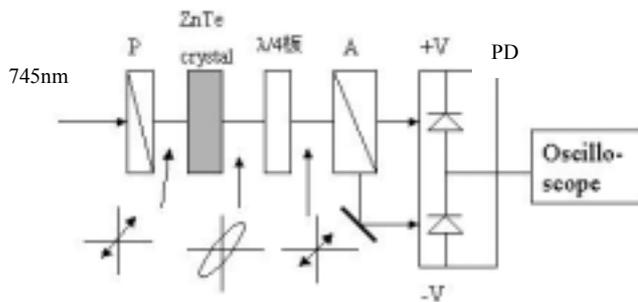


図5. 測定光学系

ZnTe に電界をかけると電気光学効果により異方性を生ずる。このため、検光子(A)で p 偏光と s 偏光に分けたときに位相差が生ずるため、ディテクタに出力電圧が生ずる。印加電界を変化させて出力電圧を測定し、規格化してプロットしたのが図6である。

- ・ 図6の直線の傾き
 - ・ ディテクタの S/N 限界 (=200)
- から測定し得る THz はの最小強度を見積もる。
- $\Delta I / I_0 = 1 / 200 = 5 \times 10^{-3}$ のとき右図のグラフの傾きから電界強度は 5×10^3 と見積もれ、 $E_{\text{THz}} = \sqrt{300} I_{\text{THz}}$ であることから、測定できる THz 波の最小強度は
- $$I_{\text{THz}} = 17 [\text{kW} / \text{cm}^2]$$
- となる。

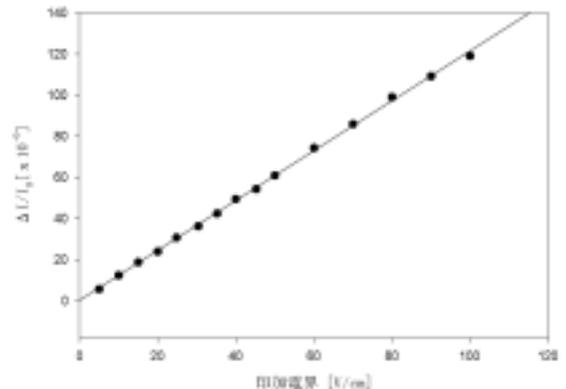


図6. 印加電界とディテクタの出力との関係

6. まとめ・今後の課題

実験の結果からダイヤモンド素子の厚みを増すことでよりすぐれたパラメータを得ることができるとわかった。

今後は、ポンプ光とプローブ光のタイミングを合わせるために、delay line を調節すること、ダイヤモンド素子にさらに高電界(10⁷V/cm程度)をかけるための工夫が必要となる。