

## 談話室

### 波を追いかけて： Exploring physics of waves

竹内 日出雄 (たけうち ひでお)



所属：工学研究科 電子情報系専攻

専門分野：光物性工学

趣味：Jazz鑑賞(ライブに通います), ユーモアのセンスの鍛錬(特にブラックユーモア)等

#### 1. はじめに

“What a difference a day makes (What a difference a day made)” という有名なジャズナンバーがあります[1]。縁は異なるものと日本語訳されるタイトルです。筆者は、まさにこのタイトル通りの人生を歩んできました。筆者が大阪市立大学でお世話になるのは、これで3回目です。第3期目といったところでしょうか。ホンダがF1に復帰したのと同じように第3期目です。筆者の簡単な略歴を表1に示しています。最初にお世話になったのは学部生時代。次にお世話になったのは、大学院後期博士課程時代。そして現在、電子情報系専攻にて准教授を務めています。企業では、製造部門や開発部に配属されました[2]。電子デバイス(LSI, 高周波トランジスター, 等)に関わる仕事でした。大学での研究は、主として光と物質との相互作用、所謂光物性工学です。光は、電磁波という波の一種。光に魅せられたためなのか、まさに波のような人生を送っています。このような荒波の中でも製造、開発および研究という世界で生き残ることができてきた主要因は、後述するように工作センターでの経験です。

表1: 著者略歴。

#### 学歴

	大阪市立大学 工学部 応用物理学科
	大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻 博士前期課程
	大阪市立大学大学院 工学研究科 応用物理学専攻 博士後期課程

#### 職歴

	ローム株式会社 LSI 生産本部 Mixed Signal LSI 製造部
	大阪工業大学 工学部 一般教育科
	三菱電機株式会社 高周波光デバイス製作所 開発部 高周波素子開発グループ
	公立大学法人 滋賀県立大学 工学部 電子システム工学科 (准教授)
	公立大学法人 大阪市立大学 工学研究科 電子情報系専攻 (准教授)

前口上は、ここまでとして。なお本稿の最終ページには、参考文献、注釈だけではなく豆知識を載せています。

現在筆者が主として取り組んでいるのは、時間領域テラヘルツ分光とテラヘルツ電磁波発生メカニズムの解明です。以下に電磁波の周波数と応用例を示します。一般的な携帯電話の周波数は、約 2 GHz ( $2.0 \times 10^9$  Hz, 波長に換算すると 150 mm)であり、IEEE での規格に従うと S バンドと呼ばれる電波です。光通信に用いられるレーザー光の波長は、1.3 μm あるいは 1.5 μm (周波数:  $2 \times 10^{14}$  Hz)です。可視光の波長領域は 400 nm ~ 700 nm (0.4 μm ~ 0.7 μm)です。テラヘルツ電磁波の周波数領域は、0.1 ~ 10 THz です ( $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$ ; 波長: 3.0 mm ~ 30 μm) [3-7]。従って、テラヘルツ電磁波は、電波と光との中間領域に位置する電磁波であると結論されます。西暦 2000 年までは、この電磁波を発生させるのが困難でした。しかしながら近年では様々な機器と周辺技術の発展により、この電磁波の研究が盛んに行われています。こうした研究で得られた成果(科学)を応用した様々な事例が報告されています。応用例として、創薬開発、バイオマテリアル研究および短距離通信等があげられます [8,9]。

テラヘルツ電磁波の発生方法には様々な手法があります。例えば超高周波トランジスターおよび量子カスケードレーザーが発生源としてあげられます [10,11]。この手法では、単に周波数領域信号しか得ることができません。一方フェムト秒パルスレーザー ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ) [12, 13] を利用したテラヘルツ電磁波発生手法では、図 1 に示すようにフォノンの時間領域信号を得ることができます。時間領域信号は、位相および減衰過程に関する情報を有しています。さらにフーリエ変換を介して周波数領域信号に変換できるという利点もあります。次章では、筆者が取り組んでいるコヒーレント縦光学フォノンからのテラヘルツ電磁波発生について述べます。

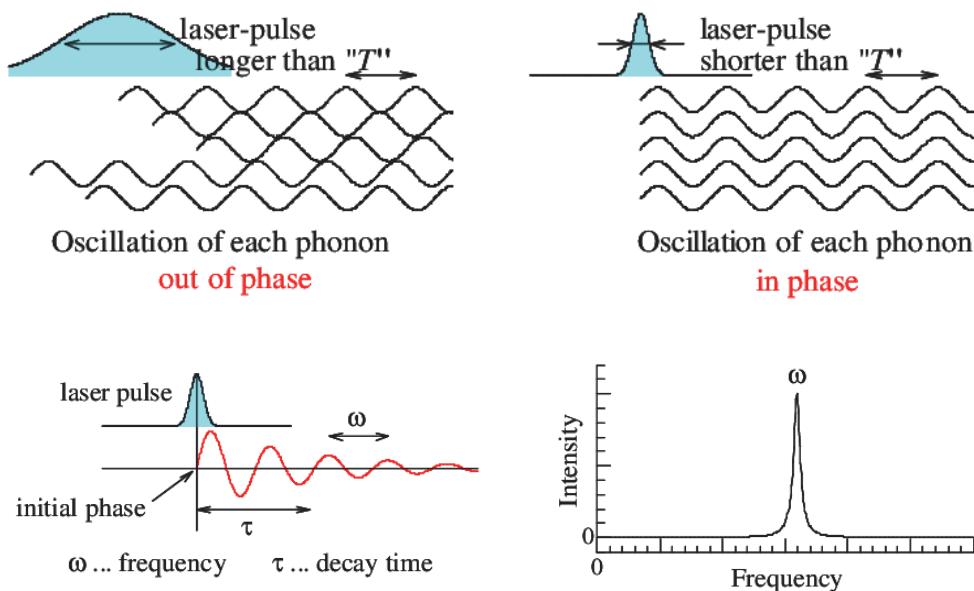
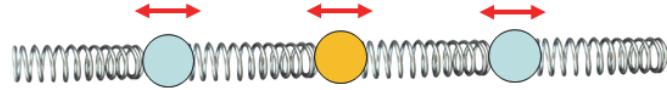
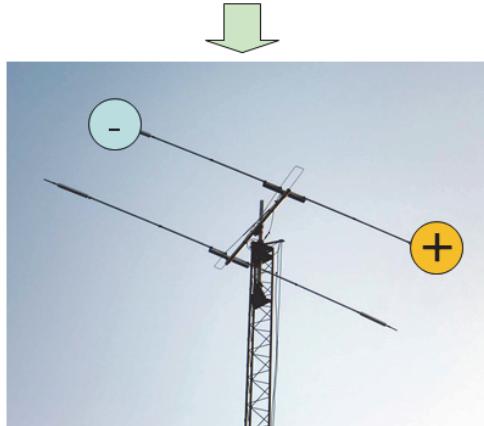


図 1: コヒーレントフォノンの概念を表す模式図。



In polar semiconductors, coherent phonons act like a dipole.



Analogy to a typical dipole.

図 2: コヒーレント縦光学フォノンと一般的な双極子アンテナとの類似性。

## 2. コヒーレント縦光学フォノンからのテラヘルツ電磁波発生と測定系

フォノンとは結晶中の格子振動です。特に光学フォノンは、一種の双極子とみなすことができます。図 2 に典型的な電波送受信双極子アンテナと光学フォノンとの対応を示します。図 2 が示す通り、フォノンは、双極子とみなすことができます。固体物理学の世界では、こうした双極子を分極と呼びます。図 1 に示すように、光学フォノンの周期より短いパルス光を照射すると、これが一種の撃力として働き、位相の揃ったフォノン集団が誘起されます。これがコヒーレント光学フォノンと呼ばれる物理現象です。光学フォノンの周波数は、テラヘルツオーダーなので、テラヘルツ電磁波発生源として注目を浴びています[14]。一般的な時間領域テラヘルツ電磁波検システムを図 3(a)に示します。この検出手法は、光ゲート法と呼ばれる手法です。図 3(b)に示すダイポールアンテナがテラヘルツ電磁波検出素子です。この素子は、高抵抗性を有する低温成長 GaAs エピタキシャル層上に金を堆積してエッチング加工されたパターンを有します。この素子にゲート光と呼ばれるフェムト秒パルスレーザー光が照射されると、キャリアが生成されます。一方ビームスプリッターで分割されたポンプ光は、試料に照射されます。この際にテラヘルツ電磁波が発生されます。このテラヘルツ電磁波は、ゲート光によって生成されたキャリアを駆動させ、結果、電流として検出されます。図 3(a)に示すステッパーと呼ばれる装置は、ゲート光とポンプ光との間で遅延時間を発生させます。テラヘルツ電磁波は、時間遅延の関数として記録されます。微小信号のためロックインアンプと光学チョッパーを用いて位相ロック交流増幅検出されます。本研究室のフェムト秒パルスレーザーは、キットを購入してハンドメイド。テラヘルツ電磁波を検出するためには欠かせない乾燥窒素ページボックス[図 3(c)]は、筆者が設計し、工作センターで作製していただいたものです。なおページボックスに取り付けられている信号を取り出すための SMA

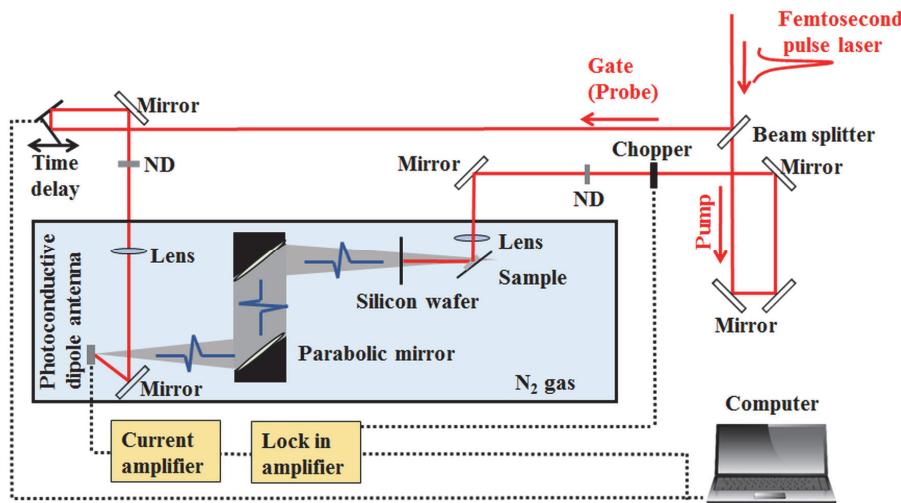
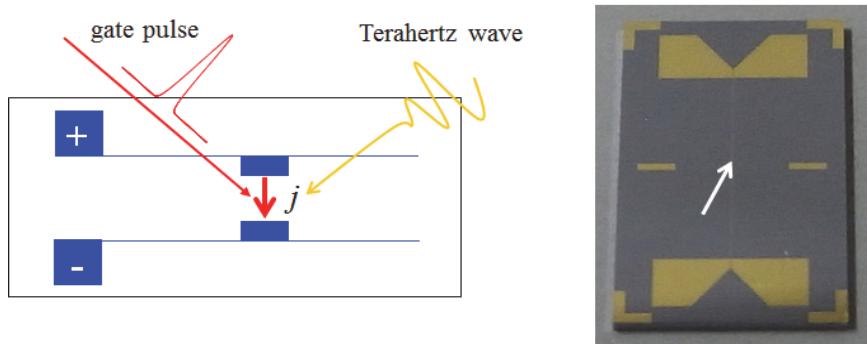


図 3(a): 光ゲート法を持った時間領域テラヘルツ電磁波検システムの模式図。



$$E_{\text{THz}}(t) \propto \frac{\partial^2}{\partial t^2} P \quad \text{P:Polarization of optical phonons.}$$

図 3(b): テラヘルツ電磁波検出用ダイポールアンテナの模式図と光学写真。

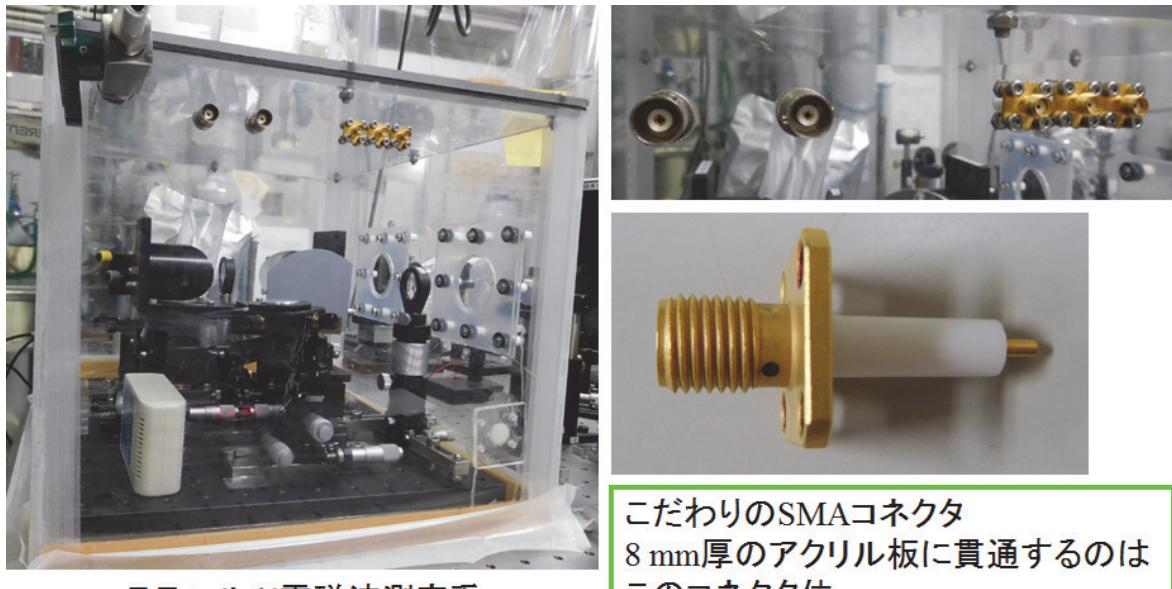


図 3(c): 工作センターで作製していただいた乾燥窒素バージボックスとージボックスに取り付けられている信号を取り出すための SMA コネクタ。

コネクタは、筆者が三菱電機社/高周波デバイス部門で働いていたからこそ見つけることができ

きたちょっと特殊なコネクタです。高周波デバイスの世界広しといえど、このコネクタの存在を知っている方は、かなり少ないと思います。工作センターの技術と筆者のアイデアで得られたページボックスです。筆者の研究室でテラヘルツ電磁波研究を促進させるために欠かせないアイテムです。

### 3. これまでに得られた時間領域テラヘルツ電磁波の研究成果

参考文献 14 で示されているように、コヒーレント光学フォノンからのテラヘルツ電磁波は、魅力的な現象です。しかしながら高強度のテラヘルツ電磁波を発生させるのは、困難とされ、複雑な試料構造とフェムト秒パルス光のフォトンエネルギー(周波数に相当)のチューニングという制約がありました。筆者は、この課題を解決するべく「コヒーレント縦光学フォノンは、巨視的な分極であるから、試料内の内部電場を利用して巨視的な縦光学フォノンの初期分極(初期振幅)を形成すればいいのではないか」という着想を得ました。図 4(a)は、筆者が提案した試料構造です。半絶縁性(001)面方位 GaAs 基板上に  $n$  型層とアンドープ層( $i$  層)を堆積した単純なものです。 $(i\text{-GaAs}/n\text{-GaAs}$  構造)。この試料作製技術は、1980 年代にはすでに確立されていました[15]。この試料のポテンシャル構造を図 4(b)に示します。 $i$  層に形成されて

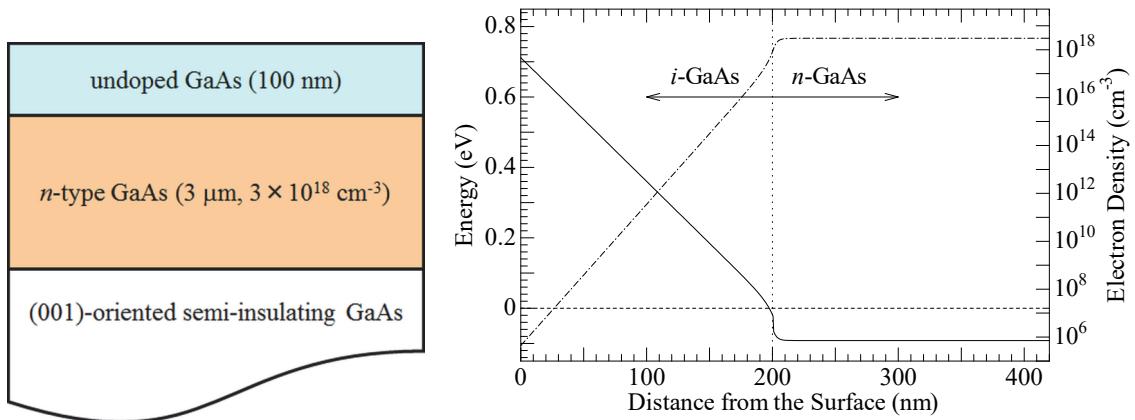


図 4: (a)筆者が提案した  $i$ -GaAs/ $n$ -GaAs 二層エピタキシャル構造と(b)そのポテンシャル構造およびキャリア(電子)分布。

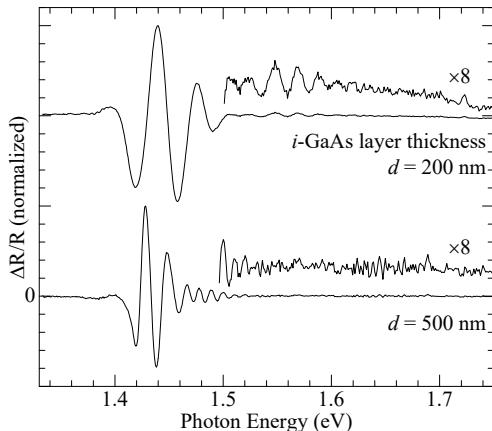


図 5(a)

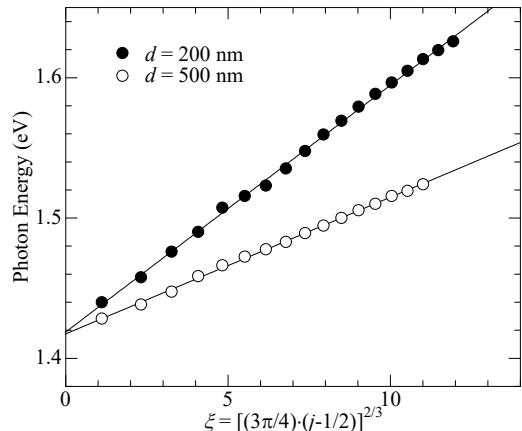


図 5(b)

図 5: (a)  $i$ -GaAs ( $d$  nm)/ $n$ -GaAs 構造で観測されたフランツ・ケルディッシュ振動と(b)その解析方法の概略。解析手法の詳細に関しては、参考文献 20 と 21 を参照。

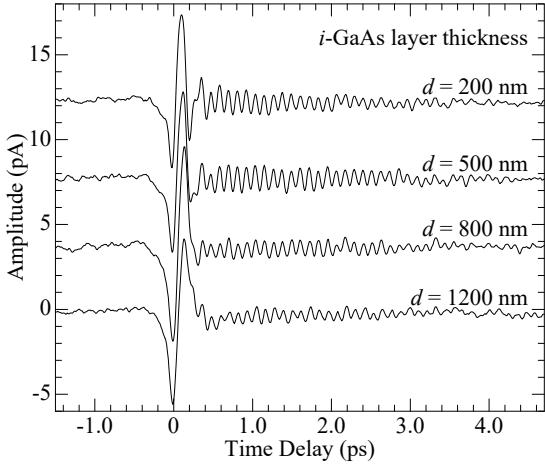


図 6

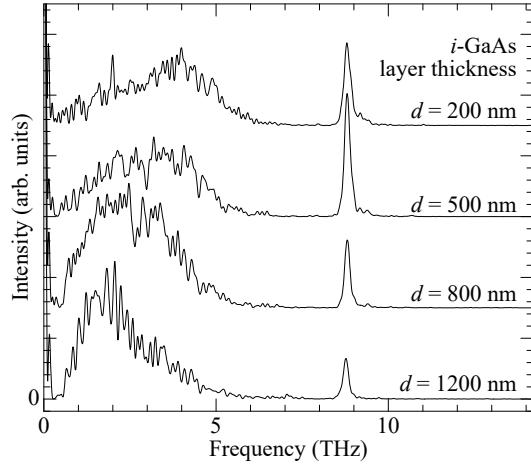


図 7

図 6: 時間遅延の関数としてプロットした時間領域テラヘルツ電磁波波形。

図 7: 図 6 で示される時間領域テラヘルツ電磁波のフーリエパワースペクトル。

いる線形的なポテンシャル勾配は、内部電場に相当します。このポテンシャル勾配は、表面フェルミピニングというよく知られている現象(半導体にたずさわっている研究者なら知っていないとモグリ扱い)からヒントを得た試料構造です。商用トランジスターが世に出る前から(1950 年代)知られていた現象です。試料表面に存在するダングリングボンドに起因します [16]。この試料にフェムト秒パルスレーザー光が照射されるとキャリアが生成されます。この際にキャリアがポテンシャルスロープを転げ落ちて瞬間的過渡電流が発生し、コヒーレント縦光学フォノンの初期分極(初期振幅に相当)を解放させます。結果、コヒーレント縦光学フォノンからテラヘルツ電磁波が放射されます。本当に内部電場がこの試料に存在するのかという疑問が沸き上がると思います。証拠を図 5 に示します[17]。内部電場は、一般に光変調反射分光法と呼ばれる手法で評価できます[18]。この分光法は、1970 年代にはすでに確立された手法です。スペクトル上に現れている「波のような」振動構造は、フランツ・ケルデイッシュ振動と呼ばれます[19]。この信号を解析することにより、内部電場を評価できます。評価手法の詳細を参考文献 20 と 21 にゆだねますが、得られた内部電場は、 $i$  層厚が 200 nm の試料では 28 kV/cm です。この試料を用いて得られた時間領域テラヘルツ電磁波を図 6 に示します[19]。時間遅延 0 ps に現れるバイポーラパルスは、瞬間的過渡電流に起因します[22]。この信号に引き続き振動構造が現れています。この振動構造の周期は、114 fs です。これは、GaAs のコヒーレント縦光学フォノンの周期に対応します。図 7 は、この時間領域信号をフーリエ変換した結果です。約 2.0 THz に出現するバンドは、上述の瞬間的過渡電流に起因するものであり、8.8 THz に現れるシャープなバンドは、コヒーレント縦光学フォノンに起因する信号です。時間領域信号の特徴を生かし、コヒーレント縦光学フォノンの寿命を探索しました[23]。図 8 に結果を示します。ポンプ光強度の増大、一光生成キャリア濃度の増加に相当一、とともに減少するという結果を得ました。コヒーレントフォノンの研究歴史は、長いものですが[24]、本結果は筆者のオリジナルな成果です。

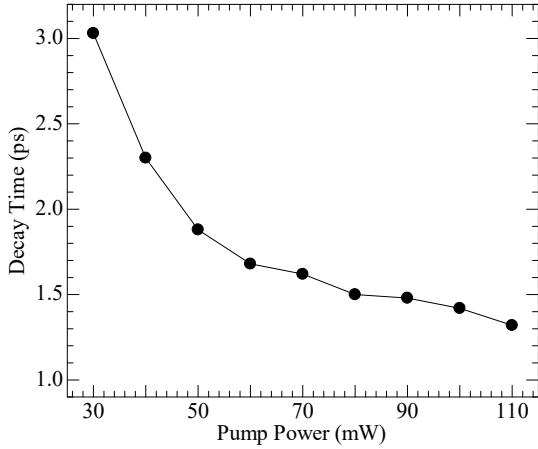


図 8

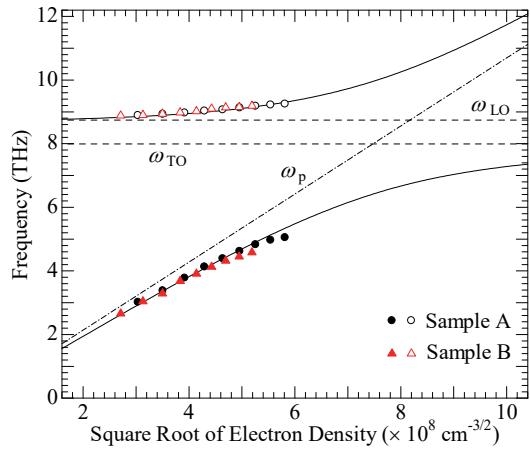


図 9

図 8: ポンプ光強度の関数としてプロットした GaAs コヒーレント縦光学フォノン寿命。

図 9: 光生成キャリアの濃度の関数としてプロットしたコヒーレント縦光学フォノン・プラズモン結合モード。

なお高密度キャリアは、縦波集団振動を起こします。いわゆるプラズモンと呼ばれるもので、光学フォノンと同様に分極を有します。コヒーレント縦光学フォノンとこのプラズモンは、縦分極を介して結合し、コヒーレント縦光学フォノン・プラズモン結合モードという連成振動を引き起こします[25]。ポンプ光強度を変化させ、光生成キャリア濃度をコントロールすることにより周波数可変テラヘルツ電磁波発生素子の実現可能性も明らかにしました[26,27]。図 9 に示すのは、光生成キャリアの関数としてプロットしたコヒーレント縦光学フォノン・プラズモンの周波数です。図 9 が示すように、周波数を光生成キャリア密度で制御できます。

これまで述べたテラヘルツ信号では、光生成キャリアによる瞬間的過渡電流信号とコヒーレント縦光学フォノン信号が混在しています。もしコヒーレント縦光学フォノンからの信号のみを発生させることができれば、単色性時間領域テラヘルツ電磁波を得ることができます。先に述べた量子カスケードレーザーでは、デバイス構造のばらつきや発熱に起因するピーク周波数数揺らぎを避けることができません。しかしながらフォノンの周波数は、物質固有の値です。従って、周波数安定単色テラヘルツ電磁波を得ることができます。これに成功した事例を紹介します。結果を述べるまえに、利用した物理現象を示します。図 10 に(111)面方位 GaAs 単結晶の原子配列を示しています。(111)面方位 GaAs は、試料に垂直な応力(面内方向で歪を生じさせることと類似)が印加されると、カチオンである Ga とアニオンである As の間で分極が発生します。これはピエゾ分極(電場)と呼ばれる現象です。理論的に(11n)面方位 GaAs に面内方向で歪を生じさせると、指数  $n$  を変化させることによりピエゾ電場を制御できることが報告されています[28]。この現象を応用した筆者の成果を図 11 と 12 に示します[29,30]。用いた試料は、分子線エピタキシー法によって(11n)面方位半絶縁性 GaAs 基板上に成長された GaAs/In<sub>0.1</sub>Al<sub>0.9</sub>As 歪多重量子井戸です。面方位指数  $n$  は、2, 3, 4 および∞です[31]。多重量子井戸の形成の前にあらかじめ In<sub>0.1</sub>Al<sub>0.9</sub>As 層厚 1.0 μm メタモルフィック干渉層

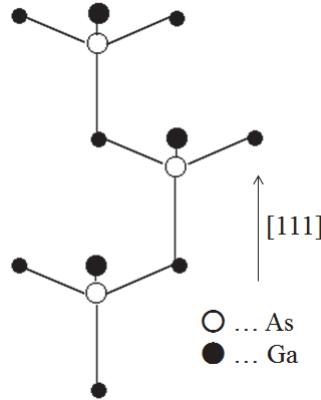


図 10: (111)面方位 GaAs 単結晶における原子配列。

疑似基板)を成長させています。従って、多重量子井戸内の GaAs 井戸層のみが格子不整合による引っ張り歪を受けます。歪多重量子井戸は、20 周期の GaAs 井戸層と  $In_{0.1}Al_{0.9}As$  障壁層で構成されています。GaAs 井戸層と  $In_{0.1}Al_{0.9}As$  障壁層の層厚は、共に 10 nm です。格子定数から推定される GaAs 井戸層内の引っ張り歪は、0.84%です(GaAs の格子定数は、0.5633 nm;  $In_{0.1}Al_{0.9}As$  の格子定数は、0.5701 nm)。参考文献 28 から理論的に見積もられる GaAs 層内のピエゾ電場は、(114) 歪多重量子井戸、(113) 歪多重量子井戸と(112)歪多重量子井戸でそれぞれ 41, 72, および 144 kV/cm です。図 11 が示すようにバイポーラパルスをほぼ凌駕するコヒーレント縦光学フォノンからのテラヘルツ電磁波が観測されています。この信号をフーリエ変換したのが図 11 です。この図から明らかなように、8.7 THz にピークを有する尖鋭なバンドが観測されています。一方、光生成キャリアに起因する 2 THz 近傍のバンドの強度は、無視できるほど強度が弱くなっています。すなわちコヒーレント縦光学フォノンに起因する単色性テラヘルツ電磁波の発生に成功したことを見ています。

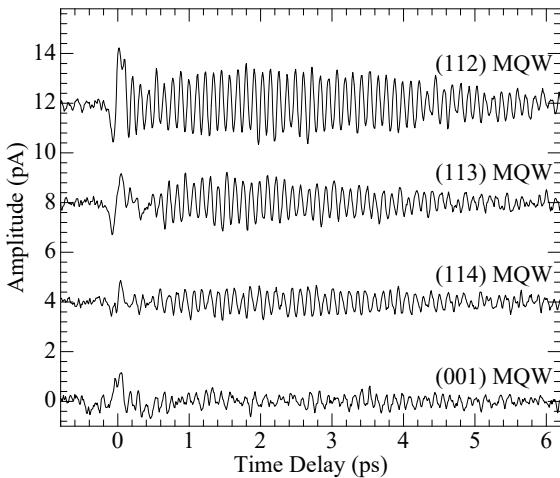


図 11

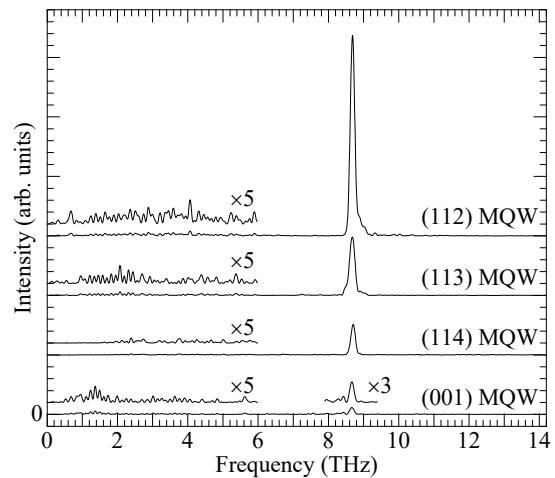


図 12

図 11: (11n)面方位歪多重量子井戸における時間領域テラヘルツ電磁波波形。

図 12: 図 11 で示したテラヘルツ電磁波波形のフーリエパワースペクトル。

因みにこれら歪多重量子井戸は、筆者が大阪市立大学/応用物理学専攻在籍時代(学生時代)にテラヘルツ電磁波発生を目指して設計した試料ではないのです。まさに What a difference a day makes。だからこそ研究って面白い知的活動だなと思っています。

#### 4. 今後の展望とまとめ

ここまで紹介した筆者以外の引用文献は、1960 年代から 80 年代にかけての論文がほとんどです。この時期は、半導体の基礎物性に対する本質的な研究がなされていた時代です。諸先輩である研究者の方々の思いは、Jazz ナンバーの Nica's Dream とほぼ類似しているような気がします[32]。

“Researchers had a vision that fundamental physics of semiconductors would one day be the novel phenomena that's of the future, you see. Don't you agree? We'll help to see that their vision will come true. And all the world will be blessed by novel phenomena too.”

この言葉を本稿の結論と結語としたいと思います。

#### 参考文献・注釈・豆知識

- [1] “*What a difference a day makes*” written by María Grever (1934)。元々はポップス音楽。数多くの Jazz ミュージシャンが歌い継いでいます。個人的には、女性 Jazz ミュージシャンである Akiko さんのアルバム「黒い瞳/Dark Eyes」(ASIN: B008861S0O, ability muse records, 2012)で謳われている曲がお勧めです。
- [2] 筆者は、所謂「企業の研究所」に在籍したことはありません。開発部でコツコツと論文と特許を書いていました。
- [3] 日常生活では、光と電波の単位をそれぞれ波長と周波数で記述します。確かに xx Hz の周波数の光という表現をなかなか耳にしません(高等学校の物理の教科書でも、光は長さの次元で記述されています)。同じ電磁波なのに不思議だと思うことがあります。
- [4] 光の色と波長との対応は、青色が約 450 nm, 緑色が約 530 nm, 赤色が約 650 nm です。
- [5] 余談になりますが、サイエンスとしての側面だけではなく、法的側面でも面白い点があります。例えば光無線通信の分野は電波法の適用外なので、無線局免許が不要です。ただし光ファイバーを伝わってきた信号が家庭内の無線ルーターを介して 2.4 GHz あるいは 5.0 GHz の電波信号になると、電波法の規制を受けます。日本の電波法では、3.0 THz 以下の周波数の電磁波を「電波」と定義しています。
- [6] テラヘルツ電磁波の周波数帯域に対する明確な定義は、IEEE(The Institute of Electrical and Electronics Engineers)にて未だ検討中です。
- [7] 本稿で定義するテラヘルツ電磁波の周波数帯を、学術雑誌 IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology で取り扱われている 300 GHz から 10 THz の周波数レンジとしています(原文: IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology is specifically aimed at the frequency range between 300 GHz and 10 THz – "Expanding the use of the Electromagnetic Spectrum.")。なお Journal of Physics D 誌に掲載された Review Paper "The 2017 terahertz science

- "and technology roadmap" [S. S. Dhillon *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. vol. 50, 043001 (2017)]では、100 GHz から 30 THz とされています[原文(Abstract より): Science and technologies based on terahertz frequency electromagnetic radiation (100 GHz - 30 THz) have developed rapidly over the last 30 years.]。On-line free なので、お時間のある方はダウンロードして、テラヘルツ電磁波の研究開発分野の動向をご覧ください。URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6463/50/4/043001>
- [8] K. M. K. H. Leong, X. Mei, W. H. Yoshida, A. Zamora, J. G. Padilla, B. S. Gorospe, K. Nguyen, and W. R. Deal, IEEE Trans. THz Sci. Technol. vol. 7, 466 (2017).
- [9] C. Walther, M. Fischer, G. Scalari, R. Terazzi, N. Hoyler, and J. Faist, Appl. Phys. Lett. vol. 91, 131122 (2007).
- [10] *Terahertz Optoelectronics*, K. Sakai ed. (Springer, Berlin, 2005).
- [11] "Terahertz Spectroscopy: Principles and Applications" S. L. Dexheimer ed. (Tutor & Francis, 2008)
- [12] "Femtosecond Laser Pulses", C. Rullière ed. (Springer, Berlin, 1998).
- [13] 光が 1 fs で進む距離は、ウィルス 3 個分程度です。
- [14] P. Gu and M. Tani, "Terahertz Radiation from Semiconductor Surfaces" in *Terahertz Optoelectronics*, K. Sakai ed. (Springer, Berlin, 2005) pp.63-97.
- [15] A. Y. Cho, J. R. Arthur, Jr, Prog. Solid State Chem. vol. 10, 157–192 (1975).
- [16] F.H. Pollak and H. Shen, Mater. Sci. Eng. R vol. 10, 275 (1993).
- [17] D.E. Aspnes, Phys. Rev. vol. 153, 972 (1967).
- [18] H. H Wieder, Surf. Sci. vol. 132, 390 (1983).
- [19] H. Takeuchi, Y. Kamo, Y. Yamamoto, T. Oku, M. Totsuka, and M. Nakayama, J. Appl. Phys. vol.97, 063708 1-16 (2005).
- [20] D. E. Aspnes and A. A. Studna, Phys. Rev. B. vol. 7, 4605 (1973).
- [21] H. Takeuchi, J. Yanagisawa, S. Tsuruta, H. Yamada, M. Hata, and M. Nakayama, Jpn J. Appl. Phys. vol. 49, 082001 (2010).
- [22] X. -C. Zhang and D. Auston, J. Appl. Phys. vol. 71, 326 (1992).
- [23] T. Dekorsy, G. C. Cho, and H. Kurz, "Light Scattering in Solids VIII" chap.4, edited by M. Cardona and G. Güntherodt (Springer, Berlin, 2000).
- [24] H. Takeuchi, T. Sumioka, and M. Nakayama, J. Vac. Sci. Technol. A vol. 35, 04D104 (2017).
- [25] I. Yokota, J. Phys. Soc. Jpn. 16, 2075 (1961).
- [26] H. Takeuchi, S. Tsuruta, and M. Nakayama, J. Appl. Phys. vol. 110, 013515 (2011).
- [27] H. Takeuchi, T. Sumioka, and M. Nakayama, IEEE Trans. THz Sci. Technol. vol.7, 124 (2017).
- [28] E. Anastassakis, Phys. Rev. B vol.46, 4744 (1992).
- [29] H. Takeuchi, S. Asai, S. Tsuruta, and M. Nakayama, Appl. Phys. Lett. vol.100, 242107 (2012).
- [30] H. Takeuchi, S. Asai, and M. Nakayama, J. Phys. Conf. Ser. vol.906, 012020 (2017).
- [31] (001)面方位は  $n \rightarrow \infty$  に対応。(001)面方位 GaAs 単結晶では、ピエゾ電場は発生しません。
- [32] "Nica's Dream" composed by Horace Silver (1956)。原曲の歌詞は" She had a vision that jazz

would one day be the music that's of the future, you see. Don't you agree? We'll help to see that her vision will come true. And all the world will be blessed by it too.” この歌詞に現れる She は、Nica こと Pannonica de Koenigswarter [ロスチャイルド(Rothschild)家出身] という女性です。Jazz つてきっと素晴らしい音楽になると信じて、若手の下済み時代を支えてきた方です。是非聞いてみたい方は、女性 Jazz ミュージシャンであるたなかりかさんの “ON GREEN DOLPHIN STREET (ASIN: B0001ZX3CG, プライエイド, 2004)” というアルバムを手にしてみてください。