室温での GaAs/AlAs 多重量子井戸構造におけるコヒーレント LO フォノンからの THz 電磁波放射

伊藤修一、溝口幸司、中山正昭 大阪市立大学大学院工学研究科 電子情報系専攻

THz radiation from coherent LO phonons in GaAs/AlAs multiple quantum wells at room temperature

S. Ito, K. Mizoguchi, and M. Nakayama

Department of Applied physics, Graduate school of Engineering, Osaka City University

We have investigated the characteristics of the terahertz (THz) radiation from coherent GaAs-like longitudinal optical (LO) phonons in GaAs/AlAs multiple quantum wells (MQWs) at room temperature. It was found that the THz radiation from coherent LO phonons in the GaAs/AlAs MQWs is resonantly enhanced under the condition that the splitting energy between the heavy-hole(HH) exciton and light-hole (LH) exciton is close to the energy of the GaAs-like LO phonon. The pump-energy dependence of the THz radiation power reaches a maximum in the energy region of the center energy between the HH- and LH-excitons. We discuss the origin of the enhancement of the THz radiation from the view point of the coupling between the HH- and LH-excitons.

<u>1.はじめに</u>

近年、コヒーレント縦光学(LO)フォノン から放射されるTHz電磁波は優れた単色性 をもつことから、大変注目されている [1,2,3]。しかしながら、半導体バルク結晶 において、コヒーレント LO フォノンから 放射されるテラヘルツ電磁波は微弱であり、 THz 光源やTHz イメージング、THz 分光 といったTHzテクノロジーに用いるのは困 難であると考えられ、高強度THz 電磁波発 生の飛躍的な展開が求められいた。

最近、我々は、GaAs/AlAs 多重量子井戸 (MQW)構造を試料として、量子井戸層に閉 じ込められたコヒーレント LO フォノンか ら高強度かつ位相緩和時間が極めて長い THz 電磁波が、ペルチェ冷却可能な 150 K 程度の温度領域で発生することを見出した [4]。しかし、THz テクノロジーへの応用の 観点では、室温において高強度のTHz 電磁 波を発生させることが一つの重要な要因で なる。そこで、本研究では、GaAs/AlAs MQW を試料として、室温でのコヒーレン トLOフォノンからのTHz 電磁波発生の特 性解析を目的とした。具体的には、THz 電 磁波発生の重い正孔(HH) 軽い正孔(LH) 励起子分裂エネルギー依存性、励起光密度 依存性および励起光エネルギーに関する研 究を行なった。

2. 試料作製と実験方法

試料には(001)GaAs 基板上に分子線エピ タキシー法により結晶成長させた (GaAs)_m/(AlAs)_m MQW (50 周期)を用いた。 ここで添え字 m は、各層を構成する原子層 数(1 原子層=0.238 nm)を表している。実験 には、m=19,21,25,30の試料を用いた。各 試料における HH 励起子エネルギーおよび LH 励起子エネルギーは、室温での光変調 反射スペクトルから見積もった。

THz 電磁波の検出は、光伝導アンテナを 用いた光ゲート法により行なった。光伝導 アンテナにはダイポール型光伝導アンテナ を用いた。ダイポール型光伝導アンテナは、 低温成長 GaAs 薄膜の上に電極間距離が 5 µm の金電極を蒸着して形成された物であ る。光源には、パルス幅約 60 fs、繰り返し 100 MHz のモード同期 Ti:Sapphire フェムト 秒パルスレーザーを用いた。励起エネルギ ーは、1.515 から 1.60 eV の間で変化させた。 測定は、全て室温で行なった。

3.実験結果と考察

図 1(a)は、(GaAs)₂₁/(AlAs)₂₁MQW および (GaAs)₃₀/(AlAs)₃₀ MQW を試料として、室温 において観測された時間分解 THz 電磁波 信号である。0 ps 付近の信号は、GaAs 基 板での過渡電流により生じる THz 電磁波 である。時間分解 THz 電磁波信号は複雑な 振動構造を示しているが、これは大気中の 水蒸気吸収によるものである。図 1(a)の挿 入時間領域信号は、大気中の水蒸気吸収を 差し引くために、1 ps 以降の時間分解 THz 電磁波号をフーリエ変換し、さらに、6 か ら 12 THz のフーリエ変換スペクトルを逆 フーリエ変換することにより得られた時 間領域信号を示している。

図 1(b)は、図 1(a)の時間分解 THz 電磁波 信号に対するフーリエ変換(FT)スペクト ルである。8.8 THz に観測されたピークは、 GaAs 型 LO フォノンエネルギー(36.8 meV) と一致することから、GaAs/AlAs MQW に おけるコヒーレント LO フォノンからの THz 電磁波に明確に帰属できる。2 つの FT スペクトルの比較から(GaAs)₂₁/(AlAs)₂₁ MQW におけるコヒーレント LO フォノン からの THz 電磁波の強度は、 (GaAs)₃₀/(AlAs)₃₀ MQW におけるコヒーレン トLOフォノンからのTHz 電磁波の強度よ りも約5倍大きくなっていることがわかる。

次に、コヒーレントLOフォノンからの THz 電磁波強度の励起光密度依存性の結果 について述べる。図2は、(GaAs)₂₁/(AlAs)₂₁ MQWにおけるその結果を示している。尚、 励起光エネルギーは、LH 励起子エネルギー (1.575 eV)に共鳴させた。図中の実線は、 コヒーレントLOフォノンからのTHz 電磁 波の強度が励起密度の2乗に比例すると仮 定した場合の直線を表しており、約2 μ J/cm²以下において実験結果とよく一致し ている。この励起光密度依存性は、以下の ように説明できる。THz 電磁波強度(FT 強 度)は、振幅の2 乗である。そして、THz 電磁波の振幅は、コヒーレントLOフォノ



図 1. (a) (GaAs)_m/(AlAs)_m MQW (m=21,30) にお ける時間分解 THz 電磁波信号。 (b)時間分解 THz 電磁波信号の FT スペクトル。



図 2. (GaAs)₂₁/(AlAs)₂₁ MQW におけるコヒー レント LO フォノンからの THz 電磁波強度の 励起光密度依存性

ンの振動分極に対する時間の2階微分に比例し、その振動分極が励起密度に比例する [5]。したがって、図2に示した実験結果は、 自然な帰結といえる。

室温において、(GaAs)21/(AlAs)21 MQW からのTHz電磁波が強く観測される原因を 調べるために、種々の層厚の GaAs/AlAs MQW を用いて、コヒーレント LO フォノ ンからの THz 電磁波強度を測定した。励起 光エネルギーは、それぞれの試料における LH 励起子エネルギーに調整した。図3は、 各層厚のGaAs/AlAs MQWにおけるコヒー レント LO フォノンから放射された THz 電 磁波の強度を各試料の HH-LH 励起子分裂 エネルギーでプロットしたものである。図 から、HH-LH 励起子分裂エネルギーと GaAs 型 LO フォノンエネルギー(36.8 meV)が一致する付近において、コヒーレン ト GaAs 型 LO フォノンからの THz 電磁波 の強度が強くなることがわかる。この励起 子分裂エネルギー依存性の振る舞いは、励



図 3. (GaAs)_m/(AlAs)_m MQW (*m*=19, 21, 25, 30)に おけるコヒーレント LO フォノンからの THz 電 磁波強度の励起子分裂エネルギー依存性

起子量子ビートとコヒーレント LO フォノ ンの結合によりコヒーレント LO フォノン が増幅される場合の結果と類似している[6]。 しかしながら、室温では励起子量子ビート が観測されていない。これは、室温におい て、量子ビートの位相緩和が極めて短いた めである。ただし、図3の実験結果におい て、HH-LH 励起子分裂エネルギー依存性 と共鳴効果があることが明らかであること から、HH 励起子と LH 励起子の瞬間的量 子干渉が、コヒーレント LO フォノンから のTHz電磁波増強の要因であると現象論的 には解釈できる。これについて、以下で考 察する。HH 励起子と LH 励起子間の瞬間 的な量子干渉による縦分極がコヒーレント LO フォノンの駆動力となっているならば、 励起光エネルギーを HH 励起子エネルギー と LH 励起子エネルギーの中心にあわせた 場合に LO フォノンの振幅が最大値をとる と期待される[7]。そこで(GaAs)21/(AlAs)21 MQW におけるコヒーレント LO フォノン



図 4. (GaAs)21/(AlAs)21 MQW における励起 光エネルギー依存性

からのTHz電磁波強度の励起エネルギー依存性を調べた(図 4)。ここで、室温における(GaAs)21/(AlAs)21 MQWのHH励起子エネルギーとLH励起子エネルギーはそれぞれ1.540eVと1.575eVである(図 4 の縦破線)。図4より、THz電磁波強度が明確な励起光エネルギー依存性を有し、HH励起子エネルギーとLH励起子エネルギーの中心付近で最大値をとることが明らかである。すなわち、この結果は、HH-LH励起子間の瞬間的な量子干渉による縦分極がコヒーレントLOフォノンを駆動していることを示唆している。

<u>4.まとめ</u>

多 様 な (GaAs)_m/(AlAs)_m MQW (m=19,21,25,30 ML)を試料として、室温 でのコヒーレント LO 型フォノンからの THz 電磁波の観測、およびその諸特性(励起 子分裂エネルギー依存性、励起光エネルギ ー依存性、および、励起光密度依存性)につ いて系統的に実験を行なった。励起子分裂 エネルギー依存性から、GaAs 型 LO フォノ ンエネルギーと HH-LH 励起子分裂エネル ギーが一致する付近でコヒーレント LO フ ォノンから放射されるTHz電磁波の強度が 増強されることが明らかとなった。この増 強機構の要因については、THz 電磁波強度 の励起光エネルギー依存性から、HH-LH 励 起子間の瞬間的な量子干渉による縦分極が 駆動力となっていると考えられる。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤 (B)(No.18340090)および基盤(C)(1756001) の支援のもとに遂行された。

参考文献

[1]T. Dekorsy, H. Auer, H. J. Bakker, H. G. Roskos, and H. Kurz, Phys. Rev. B**53**, 4005 (1996).

[2]A. V. Kuznetsov, C. J. Stanton, Phys. Rev. B**51**, 7555 (1995).

[3]M. Tani, R. Fukasawa, H. Abe, S. Matsuura, K. Sakai, and S. Nakashima, J. Appl. Phys., **83**, 2473 (1998).

[4]K. Mizoguchi, T. Furuihi, O. Kojima, M. Nakayama, S. Saito, A. Syouji, and K. Sakai, Appl. Phys. Lett., **87**, 093102 (2005)

[5]K. Mizoguchi, A. Mizumoto, and M. Nakayama, S. Saito, A. Syouji, and K. Sakai, N. yamamoto and K. Akahane, J. Appl. Phys., 100, (2006) in press.

[6]K. Mizoguchi, T. Furuichi, O. Kojima, M. Nakayama, Phys. Rev. B**60**, 233302 (2004)

[7]O. Kojima, K. Mizoguchi, and M. Nakayama, Phys. Rev. **B70**, 233306 (2004).