

研究種目：若手研究 B

研究期間：平成 19 年度～平成 20 年度

課題番号：19760010

研究課題名（和文） 同位体制御半導体中のコヒーレントフォノン物性

研究課題名（英文） Coherent Phonons of Isotopically Controlled Ge

研究代表者

森田健 (Morita Ken)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・助教

研究者番号：30448344

研究成果の概要：

本研究目的は、同位体制御半導体中のコヒーレントフォノン物性を明らかにするものであったが、50fs 以下のパルス幅が得られず、コヒーレントフォノンの観測を行う実験はできなかった。その代わりに本研究では、光通信帯における高性能な光カースイッチの実現に向けて 1.5 μm 帯におけるポンププローブ系を構築し、GaAs/AlAs 多層膜共振器構造の非線形光学応答の観測とその光スイッチング素子としての性能評価を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 19 年度	900,000 円	270,000 円	1,170,000 円
平成 20 年度	2,400,000 円	0 円	2,400,000 円
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000 円	270,000 円	3,570,000 円

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

応用物性・結晶工学

キーワード：光物性、半導体

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、同位体制御した Ge におけるフォノンのコヒーレント長は同位体制御していないものに比べて極めて長いことが期待されていた。そのため本来の研究課題は、時間分解ポンププローブ法を用いて同位体制御した Ge のコヒーレントフォノンを観測し、その位相緩和時間、空間的なコヒーレントフォノン長、フォノンの伝播距離など、今までに十分に評価できなかったコヒーレントフォノン物性を明らかにすることであった。しかし、Ge のコヒーレントフォノンを調べるためには、パルス幅が 50fs 程度のパル

スレーザが必要であり、私が赴任した研究室で実現することはできなかった。本研究では、光通信帯における光カースイッチの実現に向けた研究の方針を変えて、GaAs/AlAs 多層膜中の非線形応答の観測とその性能評価を中心に行った。

2. 研究の目的

本研究目的は、GaAs/AlAs 多層膜中の非線形応答の観測と光スイッチング素子としての性能評価である。具体的に、平成 19 年度は(1)半導体多層膜内部における電場大効果について実験・シミュレーションの両サイドから調べることを目的とした。平成 20 年度は、(2)半導体多層膜

まず GaAs バルクをフィッティングした結果から、GaAs の二光子吸収係数 $\beta = 16 \text{ cm/GW}$ と求めることができた。また、その結果に平均電場の増大係数 c をかけることで GaAs 共振器の結果をフィッティングした。その結果、平均内部電場は 41 倍増大していることが分かった。これは内部電場のシミュレーション結果 (45 倍) と良く一致する。

本研究によって、多層膜共振器中の内部電場増大は、2 光子吸収測定によって実験的に調べられることを明らかにした。また 30 周期の GaAs 共振器構造では内部の平均電場が 40 倍も増大していることが分かった。

(2) 光カー信号の Q 値依存性 [文献②, ③]

試料は N 周期 ($N = 22, 26, 30$) の GaAs 共振器構造を用いた。それぞれの Q 値はレーザパルスの透過スペクトルの測定結果 (図 5) から求め、332, 583, 934 であった。測定に用いた 100 fs パルス光のスペクトル幅 ($\sim 35 \text{ nm}$) は、各試料の共振器モードのスペクトル幅 ($\sim 2.6 - 5.5 \text{ nm}$) よりも十分に広く、パルス光パワーの透過率は、Q 値の増大に伴い 0.085, 0.05, 0.025 と低下した。

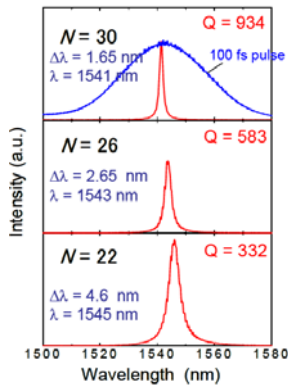


図 5 N 周期 GaAs 共振器構造の 100 fs レーザによる透過スペクトル。

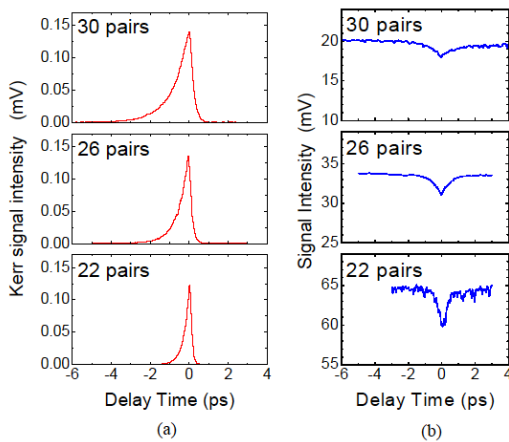


図 6 (a) N 周期 GaAs 共振器構造の光カー信号測定結果。(b) 2 光子吸収測定結果

クロスニコル配置で測定した光カー信号測定結果を図 6 (左) に示す。信号応答の時間幅は、光子寿命で決められ、Q 値が大きい共振器方が光カー信号の時間幅が長いことが分かった。また、ポンプ光およびプローブ光の透過率は Q 値が大きい共振器ほど低下しているにもかかわらず、 $\Delta t = 0$ における光カー信号強度はほとんど変化がないことが分かった。一方、2 光子吸収 (図 6 右) の $\Delta t = 0$ における変化量は、Q 値が大きい共振器の方が小さいことが分かった。

通常、光カーシグナルは以下のように表される。

$$I_{Kerr} \propto \sin^2(\Delta\phi/2), \quad \Delta\phi = 2\pi n_2 L I_{pump} / \lambda \quad (1),$$

ここで $\Delta\phi$ 非線形屈折率の変化による位相シフト、 I_{pump} がポンプ光強度、 L が試料の膜厚、 λ が波長、 n_2 非線形屈折率である。従って、光カー信号強度は $(L I_{pump})^2$ で近似することができ、また I_x はプローブ光強度に比例することから、 I_x は以下のように表すことができる。

$$I_x \propto (L I_{pump})^2 \times I_{probe} \quad (2).$$

ここで I_{probe} はプローブ光強度を表す。(2) が共振器に適応されると、 $L I_{pump}$ は $|E|^2$ の積算と考えることができ、これは Q 値に比例することが分かっている。また 100 fs のポンプ光とプローブ光の透過率 T は Q 値に依存することから 光カー信号 I_x と I_x/I_y は、

$$I_x \propto Q^2 T^2 \times T \quad (3),$$

$$I_x/I_y \propto Q^2 T^2 \quad (4),$$

で表せる。 $T \propto Q^{-1}$ とすると $I_x \propto Q^{-1}$ 、また I_x/I_y

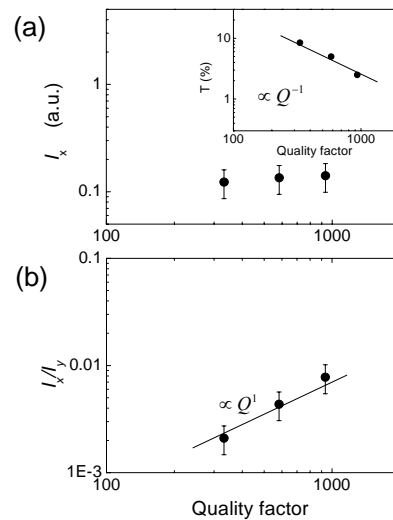


図 7 (a) $\Delta t = 0$ における Q 値に依存した 光カー信号 I_x 。(b) $\Delta t = 0$ における Q 値に依存した I_x/I_y

$\propto Q^0$ となる。しかし、図7では I_x はQ値に対してほとんど一定であり、また I_x/I_y Q値に対して比例するような結果が得られ、予想よりもQ値に対して増大していることが分かった。光カー信号強度のQ値依存性は、内部電場の増大効果だけでは説明できず、光寿命による増大効果も考慮しなければならないことが明らかになった。また本実験は、実験の都合上スペクトル幅の広い 100 fsパルスを用いているが、この結果は共振器モードよりも狭いパルスを用いれば、光カー信号強度はQ値の3乗以上になることを示し、光カー効果は、光スイッチとして大変有効であることを明らかにした。詳細は省略するが実際、光カー信号のシミュレーション結果からも光寿命の効果を取り入れないと、信号強度が説明できないことが分かっており、実験結果を良く説明できていると考えている。

(3) 歪緩和バリア層中の InAs 量子ドットを含む GaAs 共振器構造の光カー信号増大効果 [文献 APEX 投稿中]

半導体多層膜共振器構造において、高い非線形媒質を共振器層の活性層とすると、より大きな光カー信号が期待できる。特に 1.5 μm 帯に吸収を持つ歪緩和 InGaAs バリア層に埋め込んだ InAs 量子ドットは、結晶欠陥によってキャリアが高速に緩和 (~15 ps) できることから、共振器層として有望であることが分かってきた。本研究では、このような InAs 量子ドットを有する GaAs/AlAs 多層膜共振器を作製し、同様な構造で InAs 量子ドットを挿入していない GaAs 共振器構造と光カー効果について比較し、その増大効果について調べた。

試料は分子線エピタキシー法により作製し、 $\lambda/2$ 共振器層として歪緩和InGaAs層中に 2 層の InAs量子ドット層を埋め込んだ片側 13 周期の GaAs(111 nm)/AlAs(130 nm)多層膜の共振器構造である(図8)。特に2層のInAs量子ドット層は内部電場の強い共振器層中に挿入した。また比較のために共振器層をGaAs(222 nm)とした同様の GaAs共振器を用いた光カー信号も測定した。測定は、これまでと同様にパルス幅 100fs、100kHz のパルスレーザを用い、中心波長を多層膜共振器の共振器モード ($\lambda_{\text{dot}} = 1459 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{GaAs}} = 1544$

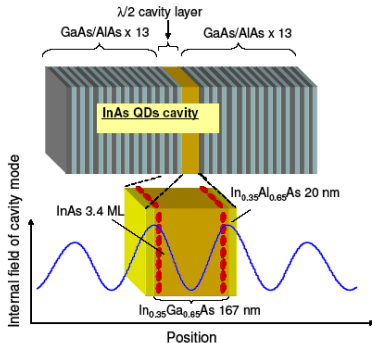


図8 歪緩和バリア層中の InAs 量子ドットを含む GaAs 共振器構造。

nm) に合わせを行った。光カー信号を測定する前に、InAs量子ドット共振器の非線形性について調べた。図9にプローブ光の縦成分を測定した時間分解測定結果を示す。GaAs共振器では、2光子吸収による負の透過率変化を観測した。一方、InAs量子ドット共振器では量子ドットの可飽和吸収効果による強い正の透過率変化を観測し、大きな非線形性が現れていることが分かった。図10に二つの試料を比較した光カー信号の測定結果を示す。光カー信号強度はInAs量子ドット共振器の方がGaAs共振器に比べて60倍も大きくなり、たった2層のInAs量子ドット層を共振器内部に挿入しただけでも、高い非線形媒質として大きな効果が得られることが分かった。このように、半導体多層膜共振器の中に歪緩和層中のInAs量子ドット層を挿入し、共鳴吸収を利用した光スイッチは、高い非線形性によって信号強度が強いというだけでなく、超高速スイッチングが可能であることから高いビットレートで動作可能な実用デバイスとして注目されると考えている。

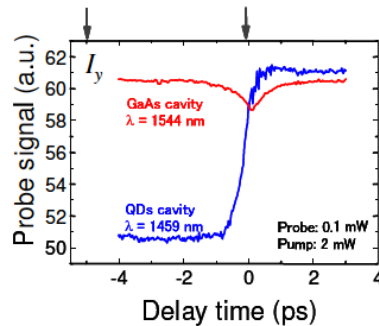


図9 $\Delta t = 0$ における GaAs 共振器と InAs 量子ドット共振器の透過率変化。

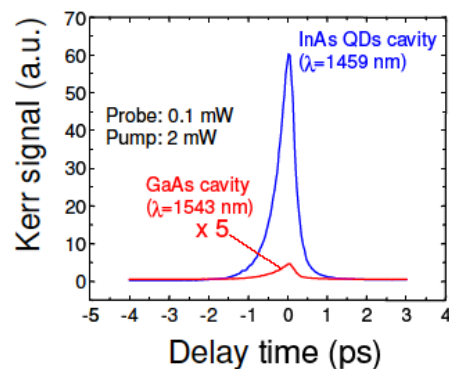


図10 $\Delta t = 0$ における GaAs 共振器と InAs 量子ドット共振器の光カー信号。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件) 査読有り

- ① K. Morita, H. Sanada, S. Matsuzaka, Y. Ohno, and H. Ohno, *Applied Physics Letters* **94**, 162104 (2009).
- ② K. Morita, T. Kanbara, S. Yano, T. Kitada and T. Isu, to be published in *physica status solidi (c)* (2009).
- ③ K. Morita, S. Yano, T. Kanbara, T. Kitada and T. Isu, *physica status solidi (c)*, **6**, 137 (2009).
- ④ T. Kanbara, S. Nakano, S. Yano, K. Morita, T. Kitada and T. Isu, *Jpn. J. App. Phys.* **48**, 04C105, (2009).
- ⑤ T. Takahashi, T. Mukai, K. Morita, T. Kitada and T. Isu, *Jpn. J. App. Phys.* **48**, 04C128, (2009).
- ⑥ T. Mukai, T. Takahashi, K. Morita, T. Kitada and T. Isu, *Jpn. J. App. Phys.* **48**, 04C106, (2009).
- ⑦ T. Kitada, T. Mukai, T. Takahashi, K. Morita, and T. Isu, *Journal of Crystal Growth* **311**, 1807 (2009).
- ⑧ Y. Kondo, M. Ono, S. Matsuzaka, K. Morita, H. Sanada, Y. Ohno and H. Ohno, *Physical Review Letters* **101**, 207601 (2008).
- ⑨ T. Kitada, N. Niki, K. Morita, and T. Isu, *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, 7839 (2008).
- ⑩ T. Kitada, T. Kanbara, K. Morita and T. Isu, *Applied Physics Express* **1**, 092302 (2008).
- ⑪ N. Niki, K. Morita, T. Kitada and T. Isu, *physica status solidi (c)* **5**, 2756 (2007).
- ⑫ T. Kitada, S. Kusunoki, M. Kinouchi, K. Morita, T. Isu and S. Shimomura, *physica status solidi (c)*, **5**, 2753 (2007).

[学会発表] (計 50 件)

- ① 森田 健, 高橋朋也, 神原 敏之, 向井拓也, 矢野 慎介, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 第 56 回応用物理学関係連合講演会講演会, 2009 年 3 月.
- ② 北田 貴弘, 向井拓也, 高橋朋也, 向所明里, 森田 健, 井須 俊郎, 第 56 回応用物理学関係連合講演会講演会, 2009 年 3 月.
- ③ 高橋朋也, 向井拓也, 向所明里, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 第 56 回応用物理学関係連合講演会講演会, 2009 年 3 月.
- ④ 北田 貴弘, 向井拓也, 高橋朋也, 向所明里, 森田 健, 井須 俊郎, 第 56 回応用物理学関係連合講演会講演会, 2009 年 3 月.
- ⑤ 井須 俊郎, 田中文也, 神原 敏之, 森田 健, 仁木 伸義, 北田 貴弘, 第 56 回応用物理学

関係連合講演会講演会, 2009 年 4 月.

- ⑥ 田中文也, 神原 敏之, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 第 56 回応用物理学関係連合講演会講演会, 2009 年 4 月.
- ⑦ 野村 英矩, 熊井 亮太, 富田 卓朗, 森田 健, 松尾 繁樹, 橋本 修一, 井須 俊郎, 第 56 回応用物理学関係連合講演会講演会, 2009 年 4 月.
- ⑧ 熊井 亮太, 富田 卓朗, 森田 健, 松尾 繁樹, 橋本 修一, 井須 俊郎, レーザー学会学術講演会第 29 回年次大会講演会, 2009 年 1 月.
- ⑨ 仁木伸義, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 2009 年 1 月.
- ⑩ 向所明里, 向井拓也, 高橋朋也, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 第 29 回レーザー学会学術講演会, 2009 年 1 月.
- ⑪ 森田 健, 仁木 伸義, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 第 19 回光物性研究会, 2008 年 12 月.
- ⑫ K. Morita, T. Kanbara, S. Yano, T. Kitada and T. Isu, The 35th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2008), Rust, Germany, September 21-24, 2008.
- ⑬ K. Morita, S. Yano, T. Kanbara, T. Kitada and T. Isu, The 8th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, EXICON 2008, Kyoto, Japan, June 22-27, 2008.
- ⑭ T. Kanbara, S. Nakano, S. Yano, K. Morita, T. Kitada and T. Isu, 2008 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2008), Tsukuba, Japan, September 23-26, 2008.
- ⑮ T. Takahashi, T. Mukai, K. Morita, T. Kitada and T. Isu, 2008 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2008), Tsukuba, Japan, September 23-26, 2008.
- ⑯ T. Mukai, T. Takahashi, K. Morita, T. Kitada and T. Isu, 2008 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2008), Tsukuba, Japan, September 23-26, 2008.
- ⑰ T. Kitada, T. Mukai, T. Takahashi, K. Morita, and T. Isu, 15th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2008), Vancouver, Aug. 2008.
- ⑱ 向井 拓也, 高橋 朋也, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 2008 年秋季第 69 回応用物理学学会学術講演会, 2008 年 9 月.
- ⑲ 仁木 伸義, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 2008 年秋季第 69 回応用物理学学会学術講演会, 2008 年 9 月.
- ⑳ 北田 貴弘, 神原 敏之, 矢野 慎介, 森田 健, 井須 俊郎, 2008 年秋季第 69 回応用物理学学会学術講演会, 2008 年 9 月.
- 21 矢野 慎介, 神原 敏之, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 2008 年秋季第 69 回応用物理学

- 会学術講演会, 2008年9月.
- 22 森田 健, 神原 敏之, 矢野 慎介, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 2008年秋季第69回応用物理学会学術講演会, 2008年9月.
 - 23 神原 敏之, 矢野 慎介, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 2008年秋季第69回応用物理学会学術講演会, 2008年9月.
 - 24 高橋 朋也, 向井 拓也, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 2008年秋季第69回応用物理学会学術講演会, 2008年9月.
 - 25 矢野 慎介, 神原 敏之, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 応用物理学会中国四国支部2008年度支部学術講演会, 2008年8月.
 - 26 高橋 朋也, 向井 拓也, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 応用物理学会中国四国支部2008年度支部学術講演会, 2008年8月.
 - 27 仁木 伸義, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 応用物理学会中国四国支部2008年度支部学術講演会, 2008年8月.
 - 28 神原 敏之, 矢野 慎介, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 応用物理学会中国四国支部2008年度支部学術講演会, 2008年8月.
 - 29 向井 拓也, 高橋 朋也, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 応用物理学会中国四国支部2008年度支部学術講演会, 2008年8月.
 - 30 N. Niki, K. Morita, T. Kitada and T. Isu, The 7th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, EXICON 2007, Kyoto, Japan, 2007.
 - 31 T. Kitada, S. Kusunoki, M. Kinouchi, K. Morita, T. Isu and S. Shimomura, The 7th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, EXICON 2007, Kyoto, Japan, 2007.
 - 32 T. Takahashi, T. Mukai, K. Morita, T. Kitada and T. Isu, 27th Electronic Materials Symposium (EMS27), July 2008.
 - 33 T. Kanbara, S. Nakano, S. Yano, K. Morita, T. Kitada and T. Isu, 27th Electronic Materials Symposium (EMS27), July 2008.
 - 34 北田 貴弘, 神原 敏之, 森田 健, 井須 俊郎, 第55回応用物理学関係連合講演会, 2008年3月.
 - 35 神原 敏之, 仲野 翔也, 矢野 慎介, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 第55回応用物理学関係連合講演会, 2008年3月.
 - 36 森田 健, 神原 敏之, 仲野 翔也, 矢野 慎介, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 第55回応用物理学関係連合講演会, 2008年3月.
 - 37 向井 拓也, 高橋 朋也, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 第55回応用物理学関係連合講演会, 2008年3月.
 - 38 北田 貴弘, 楠 真一郎, 木内 将登, 森田 健, 下村 哲, 井須 俊郎, 第1回フロンティア研究センターシンポジウム, 2007年12月.
 - 39 神原 敏之, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 第1回フロンティア研究センターシンポジ

ウム, 2007年12月.

- 40 仁木 伸義, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 2007年12月.
- 41 向井 拓也, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 赤羽 浩一, 山本 直克, 第1回フロンティア研究センターシンポジウム, 2007年12月.
- 42 北田 貴弘, 森田 健, 井須 俊郎, 応用物理学会中国四国支部研究会, 2007年12月.
- 43 北田 貴弘, 楠 慎一郎, 木内 将登, 森田 健, 下村 哲, 井須 俊郎, 第68回応用物理学会学術講演会, 2007年9月.
- 44 仁木 伸義, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 第68回応用物理学会学術講演会, 2007年9月.
- 45 神原 敏之, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 2007年9月.
- 46 向井 拓也, 森田 健, 北田 貴弘, 赤羽 浩一, 山本 直克, 井須 俊郎, 応用物理学会中国四国支部2007年度支部学術講演会, 2007年8月.
- 47 神原 敏之, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 応用物理学会中国四国支部2007年度支部学術講演会, 2007年8月.
- 48 仁木 伸義, 森田 健, 北田 貴弘, 井須 俊郎, 応用物理学会中国四国支部2007年度支部学術講演会, 2007年8月.
- 49 T. Mukai, K. Morita, T. Kitada, K. Akahane, N. Yamamoto and T. Isu, 26th Electron Material Symposium, (EMS), July 2007
- 50 井須 俊郎, 向井 拓也, 森田 健, 北田 貴弘, 赤羽 浩一, 山本 直克, 第3回量子ナノ材料セミナー, 2007年6月.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森田健 (Morita Ken)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・助教

研究者番号 : 30448344