

氏 名	たんのなかひろ 丹野直弘
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和51年10月13日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最終学歴	昭和42年3月 山形大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了
学位論文題目	原子気体系におけるコヒーレントな非線形光学効果 に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 稲場 文男 東北大学教授 高橋 正 東北大学教授 堀江 忠児 東北大学教授 柴田 幸男

論 文 内 容 要 旨

第1章 総 論

光と物質粒子との相互作用に基づく諸現象は、レーザー作用の発見を端緒として分光学や物性研究などの基礎的研究から光通信や情報処理等へと応用され研究されて来ている。これまでこの様な諸現象の取扱いは粒子集団の場合でも一原子モデルで近似し、多くの場合1光子の関与する2準位系原子あるいは分子に限って解明されて来た。

本論文はこれまでほとんど研究が為されていない多光子の関与する高次のコヒーレント効果を明らかにする目的で為され、一原子近似では表わされないDickeの提唱した cooperative な原子集団¹⁾を考え、多準位系で多光子の関与するコヒーレントな相互作用を記述する基礎運動方程式を理論的に新たに導き、それにもとづいてカリウム原子気体系において諸実験を行い種々の新しい知見を得たものである。まず、2光子共鳴吸収とそれに基づく自然放出機構の dynamics を

明らかにし、超放射現象の直接観測に初めて成功した。次に2光子Bloch方程式を導出しMaxwell方程式との結合により2周波光子のarea theoremを新たに導出して、2光子光パルスの無損失、無歪み伝搬、即ち2光子自己誘導透過(self-induced transparency, SIT)といわれる新現象を見出したこと等について、理論および実験の両面から論述している。

第2章 多準位系のコヒーレントな非線形光学効果の基本的考察

本章では、多準位系における多光子の関与するコヒーレントな相互作用を記述する基礎運動方程式をまず導出する。本研究で考える多準位系と関与する光子の周波数と電界は図1に示すものである。この異同波4光子過程は、媒質の密度行列の手法を用いて、非共鳴準位2の繰込みを行いSchrödinger方程式より記述でき、Blochベクトルに類似な表現で表わせる。

この基礎運動方程式は図1に示す4準位系における全てのコヒーレントな非線形効果を含む。本研究では以上の基礎運動方程式を基に多光子過程における観測可能な低次の現象にまず注目し、ついで高次過程における諸効果を上式より明らかにした。また、伝搬を考え、Maxwell方程式との結合を行ない多光子パルスのコヒーレントな伝搬効果を解明している。

諸効果の実験上の条件についても詳細に検討を加え、観測に必要な諸条件を具体的に示している。

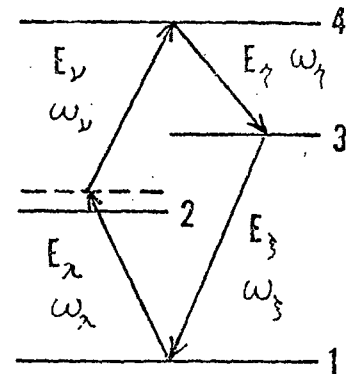


図1 4準位系における異同波4光子過程

第3章 多準位系のコヒーレントな非線形光学効果の実験方法および装置

コヒーレントな多光子過程にもとづいて非線形光学効果を観測するためには、前章で示した諸条件を満足する実験装置が必要で、本章では試作した諸装置と得られたそれらの特性について述べる。まず、準位1-4間の2光子共鳴励起に必要な周波数の異なる ω_λ , ω_ν の2周波同時発振レーザーとして、Qスイッチルビーレーザーとニトロベンゼンのストークス・ラマンレーザーの発振装置を試作し、単一モード同時発振に成功した。2光子共鳴に必要な波長同調はルビーロッドの温度制御で行い、 $0.0068 \text{ \AA}/0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ の精度で可変である。非線形媒質として分光学的定数の良く知られた原子ガス系のカリウムを選択した。図1の準位1~4は、 $4S_{y_2}$, $4P_{3/2}$, $5P_{3/2}$, $6S_{y_2}$ 準位に相当し、試作した2周波レーザーで $4S_{y_2} - 4P_{3/2} - 6S_{y_2}$ 準位間に2光子共鳴が可能で、2光子吸収曲線を測定し同調特性を明らかにした。また、カリウム蒸気圧を制御できる試作オープンについても述べた。

第4章 2光子共鳴吸収と自然放出過程の理論的解析

非線形光学過程の最も低次の現象である2光子過程は、本研究では異周波の2光子共鳴吸収に当る。始めにその dynamics を記述する運動方程式を第2章の基礎運動方程式より明らかにした。その結果、1光子吸収の Beer's/cm に類似の2光子吸収則を量子論的に初めて厳密に導き、さらに2光子飽和効果や2光子シュタルク効果を明らかにした。

次いで、2光子共鳴吸収を経て生じる準位4-3間の誘導放出遷移とさらに引き続き生じる基底準位への自然放出過程における放射電界の動的振舞を解析し、準位3の自然寿命に相当する時間だけ放射電界 E_{ξ} のパルスピークが遅れることを見出した。さらに、この自然放出過程では、原子密度が増し放射電界が大きくなると cooperative 長内の原子は、その密度の二乗に比例する超放射を行うことを理論的に明らかにし、その諸特性についてカリウム原子系を具体的対象として解析し考察を加えた。

第5章 2光子共鳴吸収と自然放出過程の実験的検討

2周波同時発振レーザーのカリウム原子系への同調特性を基に、吸収スペクトルの測定を行ない、入力強度を種々変えて実験を行なった結果、2光子飽和効果やシュタルク効果が観測された。これらの結果はどれも前章の理論計算の結果とも良く一致する特性を示した。

また、 $5P_{3/2}$ 準位からの 4048\AA の violet emissin (自然放出光) の動的特性を広帯域シンクロスコープで観測したところ、2周波レーザーの励起時間より準位の自然寿命 31 nsec に相応するパルスピークの遅れが見い出された。さらに、励起強度をあげ、その入力を一定に保ち violet emissin 強度の原子密度依存性を測定した。その結果を図2に示す。放射強度は低密度域では自然放出光であるが、図に示すように約 $4 \times 10^{13} / \text{cm}^3$ 以上の領域では、原子密度の二乗に比例し、この時観測されたパルス幅は 5 nsec 以下で系の横緩和時間 140 nsec や、レーザーパルス幅 20 nsec より極めて狭い。これらの特性は超放射光であることを示しており、本研究で初めて観測され、その諸特徴を明らかにできた。

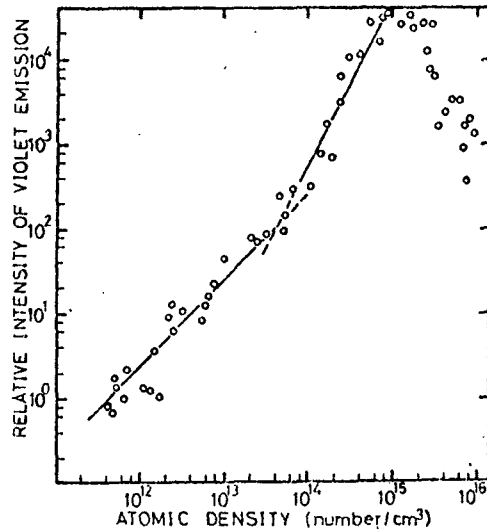


図2 Violet emission (ω_{ξ}) 超放射光のカリウム原子密度依存性

第 6 章 2 光子共鳴自己誘導透過効果の理論的解析

3 単位系における 2 光子共鳴媒質の運動方程式は、基礎運動方程式より導出され、“2 光子 Bloch 方程式”と名付けた。²⁾ 媒質の十分長い横緩和時間を仮定して、2 光子のコヒーレント伝搬を記述する方程式は Maxwell 方程式との結合によって求め、次式の 2 周波光子の area theorem を導いた。

$$\frac{d}{dZ} \int_{-\infty}^{\infty} E_j^2 dt = \frac{\beta_j}{t} (\cos \varphi - 1) \quad (1)$$

ここで、 β_j は伝搬定数、 t は 2 光子 gyroelectric ratio、 φ は $t \int_{-\infty}^{\infty} E_\lambda E_\nu dt$ で定義される 2 光子パルス area である。(1)式は $\varphi = 2n\pi$ の時、損失なし伝搬となることを意味し、2 光子の各々のパルスエネルギーが保存されると云う 2 光子 SIT の存在は明らかである。この時、無歪な定常伝搬パルスはローレンツ型をとり、SIT のしきい値は 2π となることが判った。

伝搬における過渡的なパルス整形の様子は数値解によって求められ、その例を図 3 に示す。入力 area の大小によって、図に示すように peak amplification や pulse breakup が各々のパルスについて生じる。さらに、エネルギー透過度や特異なパルスの進みや遅れなどの現象も見出し、理論的に解明した。

第 7 章 2 光子共鳴自己誘導透過効果の実験的検討

これまで、2 光子遷移におけるコヒーレントな伝搬については全く実験が報告されていないが、コヒーレントな相互作用の条件を満足するように実験方法と装置を準備し、2 光子パルス伝搬の実験を行なった。

カリウム蒸気を満たしたセルを伝搬媒質として、2 周波レーザーの 1.5 乃至 1.9 nsec のパルス幅の 2 光子パルスの伝搬波形を観測した。その結果の一例を図 4 に示す。まず、図 4 に示すような peak amplification や pulse breakup のひっかけかりを示す 2 光子 SIT 特有の伝搬パルス波形が観測された。さらに図 5 に示すようにパルスエネルギーの透過度の測定から、透過度が 1 になる領域のあることが判り、また、パルスピークの進みや遅れも観測され、いずれも前章の

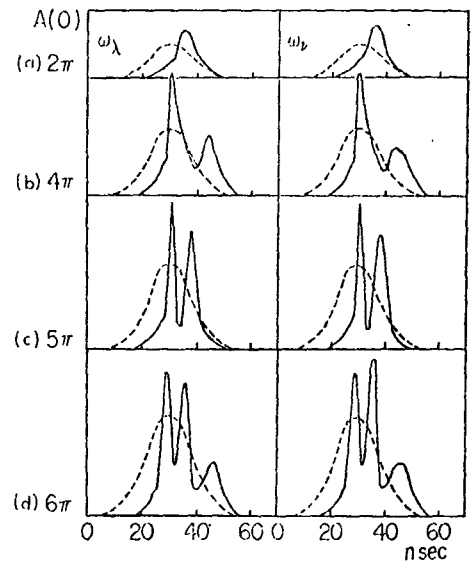


図 3 コヒーレントな 2 光子伝搬パルスの過渡的な数値解
A(0)は入力パルス area, 点線は入力パルス波形, 実線は媒質透過後の出力パルス波形

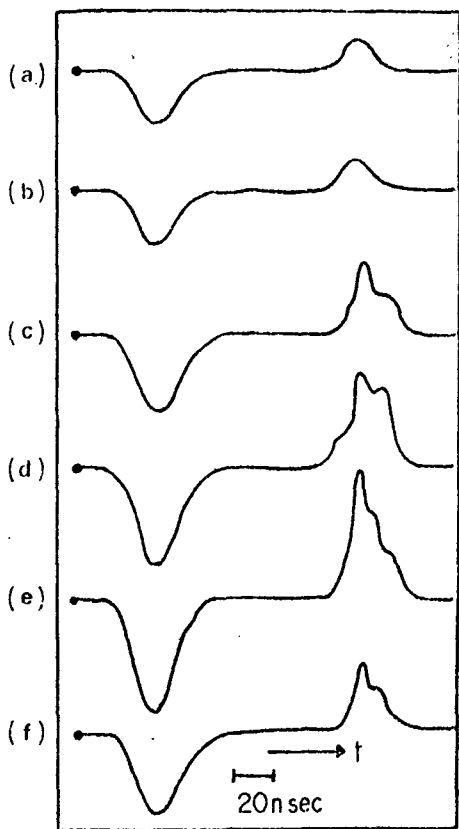


図4 ルビーとラマンレーザー光の入力パルス(左波形と出力パルス(右波形の観測例 (a), (b)の出力パルスはカリウム蒸気のない場合のセル透過波形で(a)はルビー光, (b)はラマン光。(c)-(e)は蒸気のある場合で入力を変えた場合のルビー光の変調波形。(f)はラマン光の波形。

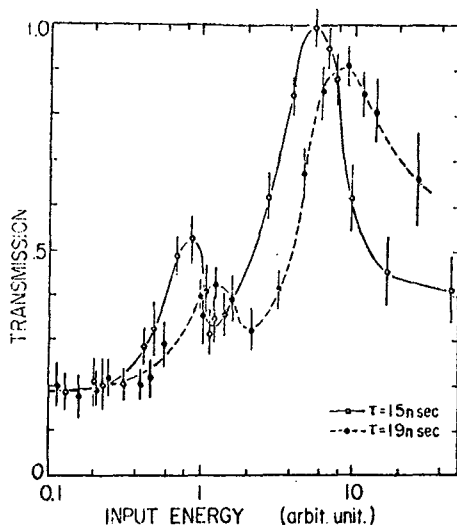


図5 ルビー光のエネルギー透過度の入力エネルギー依存性の測定結果。2種のパルス幅について観測した例。

理論解析の結果と良く一致する特性が明らかにされ、初めて2光子SITを実験的に実証した。

第8章 結 論

最近、原子間のコヒーレンスやその放射過程の dynamics が注目されるに至り「コヒーレントな非線形光学」が量子エレクトロニクスの新分野として研究が展開されて来ているが、まだその緒についたばかりである。本論文はこれまでほとんど研究が為されていない2光子共鳴の dynamics を中心として、まず新しく媒質の基礎運動方程式を導出し、2光子吸収則をはじめ、2光子飽和効果、2光子シュタルク効果を理論的に解明し、カリウム原子系の実験において確めた。さらに、2光子励起にもとづく超放射光の直接観測に成功し、それらの諸特性を明らかにした。

また、2光子Bloch方程式を導出して2光子パルスのコヒーレント伝搬を解析し2光子 area theoremを導き、カリウム原子系で伝搬実験を行ない理論解析と良く一致する伝搬パルスの peak amplification や pulse breakup, さらには無損失に近い透過やパルスの進みや遅れなどの観測によって、2光子SITを初めて明らかにした。

本研究で見いだされたコヒーレントな非線形光学の新たな知見は、今後コヒーレント分光、ピコ秒分光、光物性さらには光エレクトロニクス等の諸分野における進展の基礎となることを期待して本論文のまとめとする。

文 献

- 1) R. H. Dicke : Phys. Rev. 93, 99 (1954)
- 2) N. Tanno et al. : J. of Phys. B, 8, 339 (1975)

審査結果の要旨

原子や分子からなる多粒子系においては、その系の横緩和時間より短い時間内に系の固有遷移に共鳴するようなコヒーレント光が入射すると、光と物質の双方の波動性が本質的役割を果たすような過渡的な相互作用が生じる。このような現象についての研究は、単色性のすぐれた極めて短いパルス幅の光を発生するレーザー技術の進歩によって開かれたものであるが、これまでは殆んど単一波長のレーザー光パルスと物質との相互作用のみが研究されていた。

著者は物質が多くのエネルギー準位で構成され、複数の異なる波長の光との共鳴的な相互作用が一般に生じうることに注目し、その基本的な非線形結合過程を系統的に解明するために、カリウム原子気体系を用いて理論と実験の両面から研究を進めてきた。本論文はその研究成果をとりまとめたもので、全文 8 章と付録よりなっている。

第 1 章は総論である。第 2 章では、コヒーレントに励起された多準位原子系における非線形光学効果を記述する一般的な運動方程式を密度行列の手法を用いて導き、以下の各章で述べる相互作用過程の分類を行っている。

第 3 章は、実験において重要な役割を果たす 2 波長同時発振レーザー装置の設計、試作と波長同調法を中心として、実験装置の構成と実験方法を記述したものである。また、非線形共鳴媒質として用いるカリウム原子系の吸収特性や共鳴幅の温度依存性などを綿密に測定して基礎資料として示している。

第 4 章では、4 準位系における 2 光子共鳴効果の解析を行い、2 光子吸収則やその飽和過程、2 光子シュタルク効果を理論的に明らかにし、さらに他の準位を介して発生する自然放出光の動的特性や超放射現象を定量的に解明している。

第 5 章では、カリウム原子の基底準位と励起準位の間で生じる 2 光子共鳴吸収スペクトルの詳細な測定を行うと共に、中間の準位を介して派生する自然放出光および超放射光の特性を系統的に提示し、いずれも前章の解析結果とよく一致することを確認している。これらは興味深い新しい知見である。

第 6 章では、多準位系における異波長 2 光子共鳴吸収現象を記述する 2 光子ブロッホ方程式を導出し、これとマックスウエル方程式を結合させて、2 光子パルス伝搬の理論的解析を行っている。その結果、波長の異なる 2 つのパルス光で損失なしの同時伝搬、すなわち 2 光子自己誘導透過現象の生じることが理論的にはじめて提示され、その発生条件および基本的な諸特性が明らかにされた。

第7章では、2波長同時発振レーザ装置によって得られる超短パルス光を用いて、カリウム気体原子中の伝搬効果の実験を行い、透過パルス波形や透過光強度の測定から、前章で理論的に明らかにされた2光子自己誘導透過効果がこの原子気体系において生じていることを実証している。これらの理論的ならびに実験的成果は高く評価される。

第8章は総括と結論である。

以上要するに本論文は、コヒーレントに励起された原子気体系とレーザ光パルスとの相互作用における基本的な非線形光学効果とその本質的特性を理論的、実験的に究明し、工学的な応用の可能性をも提示して、有用な知見を加えたもので、電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。