

〈一般研究課題〉 生活環境快適化を目的とした
通信素子高速化に関する応用研究
助成研究者 中京大学 田口 博久



生活環境快適化を目的とした 通信素子高速化に関する応用研究

田口 博久
(中京大学)

Applied research on the communication device speed for the purpose of living environment comfort

Hirohisa Taguchi
(Chukyo University)

Abstract :

In this study, it was irradiated with ultra-short Pulse Laser (pulse width 100 fs) in Optical Detector with the InGaAs layer in the active layer. Auger recombination process inside InGaAs layer is observed extremely distinctly. In the previous studies, disappearance process by the drift motion of the carriers in the carrier annihilation process and the InGaAs layer due to Auger recombination could not be clearly observed. Relationship of the first peak period and the second peak period has been shown distinctly by the ultra-short Pulse Laser used in this study. In addition, the time constant analysis of Auger recombination zone, the carrier surface density of the InGaAs layer in excess of $10E12 \text{ cm}^{-2}$ after pulse irradiation, its shortest disappearance time is $9.95E-11$ seconds was measured. By utilizing the above characteristics, Communication speed that affect the comfort of the living environment makes it possible to further speed-up, the possibility of a dramatic improvement of the living environment has been suggested.

1. はじめに

通信技術は現代社会において欠かすことのできない技術となっている。ほとんどの人は24時間通信技術を利用している。携帯電話やスマートフォンに代表される通信機器によって、地球上であれば常にインターネットに接続可能な環境下に置かれ、接続環境を強化する意味で、市街には様々

な公共無線サービスが展開されている。1979年にNTTが東京近郊で開始した[1]。この時の通信速度は0.3 kilobits per second (kbps)であった。2016年初頭に総務省管轄の「インターネットのサービス品質計測等の在り方に関する研究会」による実際の利用シーンに即した通信速度は、NTT DoCoMo社での最大速度は53～91 Megabits per second (Mbps)(Android下り実効速度)と示された[2]。通信機材はショルダーバック型の巨大な通信デバイスから、手札型のタブレットと変貌した上、10⁵倍以上の通信速度向上が実現されている。40年に満たない年数で通信技術は異様なまでに高性能化したといえる。

●通信速度に対する市場要求

通信速度向上は2016年時点でも市場要求を満たしきっていない[3]。映像技術の世界では3D-TVはすでに実現済みであり、4K-TVから8K-TVへの移行がすでに検討が始まっている。ユーザーが手に持つ通信デバイスを高機能化し、高精度画像視聴に耐えうる構造にすることは困難ではないが、そもそも高精度動画像を送受信には100Mbps程度では実現不可能である。現代社会においてユーザーが求める通信は何も高精度動画像の送受信のみではない。Social Networking Service (SNS) による自己表現や、ネットワーキングを利用した在宅ワーク及びミーティング参加、Terabitsレベルのクラウドストレージの利用、さまざまな電化製品のネットワークコントロール、Global Positioning System (GPS) に依存しないカーナビゲーションシステムの利用など、生活環境を快適化するための様々な家電やデバイスに通信技術を使用している。結果、複数の通信技術を1ユーザーが使用し、単位時間当たりの情報送受信量は年次を追うごとに増加する一方である。生活環境のさらなる向上を目的として、通信速度は常にアップグレードを求められている。

●無線通信以外の通信技術

無線通信のみが通信速度を決めているわけではない。通信の根幹は光ファイバーを利用した光通信である。図1に光通信システム概略図を示す[4]。基幹路線から光ファイバーを通して送られた信号は基地局から分岐され最終経路として電気信号へと変換が行われる。最初に変換を行う場所は光検出器であり、ここで光信号は電気信号へと変換される。受信部において検出器を通過した電気信号は増幅器により信号強度を高め、さらに信号復元器を通過し信号上のエラーが訂正されてからシステムに送られる。ここにおいて初めて信号の可視化が行われ、テキストや画像データとして認知がされる。送信部はシステム後に用意され、システムからおくられた信号情報が変調器を通過してLaser Diodeにより光信号へと変換され、光ファイバー上に信号は乗る。無線通信は光通信が終端したのちに用いられる。個人宅でもFiber to the Home (FTTH)を用いて自宅内部に光ファイバーを導入し、そののちに無線ルーターなどを経由

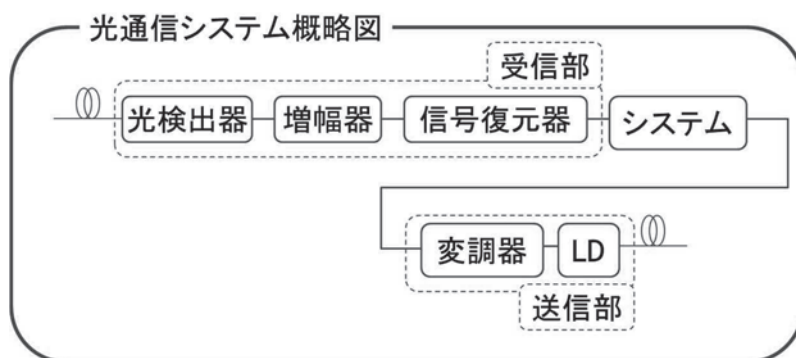


図1 光通信システム概略図

した宅内無線LANが形成されるケースが2016年時点では一般的となっている。光通信自体はパケット通信方式で行われているが、通信を実現するためには光で送られた信号をどこかで電子に置き換え、電気信号に変更する必要がある。ここが光通信における速度律速である。つまり、通信波長帯1550nmで送信された信号を、その速度を落とすことなく電気信号へ変換出来れば理想的なのだが、ここは受光素子の物性によって律速される。

●通信速度を律速する材料物性と探索的材料系

通信速度を律速しているものは、いつの時代も個体デバイスの物性である[5]。NTT DoCoMoがi-modeを使用していた時代の通信速度は800MHzであった。これは通信デバイスの材料系としてSiを使用しており、Si中を通過するキャリアの速度によって律速である。2001年5月にNTT DoCoMoがFOMAサービスとして世界発の第三代携帯電話を市場に投入した。これにより通信速度は2.4GHzレベルと各段に向上した。このとき送受信デバイス材料としてSiより電子移動度が5倍以上の化合物半導体であるGaAsを投入し実現した。このGaAs材料系は2016年時点でも現役であると同時に、今後の高速化を視野に入れ材料系変更が検討されている[6]。

検討材料系はInGaAsである。これはイオン結合性を持つ閃亜鉛鉱型結晶であるGaAsの材料構造を踏襲しつつ、Ga原子の一部をIn原子に置き換えることによってGaAs物性をInAs物性に類似させることを目的とした材料系である。InAsの電子移動度はGaAsの約3倍であり、さらなる高速化が期待される。事実InGaAsを用いたFET構造で、結晶材料にヘテロ構造を持つHigh Electron Mobility Transistor (HEMT)は世界最速のFETとして知られる[7]。しかしながらこの材料系は自然界には存在しないためMetal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD)により非効率的に生産される。さらには材料物性自体も調査完了ではなく、探索的材料系を前提としてデバイス応用がなされている。

InGaAsはIn比率を47%、Gaを53%に設定することにより格子定数をInPと同一になる。これはInGaAsのバンドギャップ幅が0.83eVである。これは光波長に変換すると1550nmとなり、通信波長帯に一致する。つまりInGaAsを材料系として光応答素子を作成すれば超高速応答が見込める。超高速応答を確認し、かつその動作原理を理解することがInGaAs材料系を最も効率よく使用する方法である[8]。

●本研究概略

筆者は上記バックグラウンドを前提としてInGaAsを材料系に持つ受光素子内部における電子輸送モデルの研究を行ってきた。受光素子に対して1550nmの通信波長光を導入し、その応答特性を観測した。初期の実験モデルでは応答特性を過渡応答と解釈し、500 Femto Second (500×10^{-15} 秒)パルス光を受光素子に導入したものであった。研究においてInGaAs層を活性層にもつOptical Detectorに、パルス幅100fsの極短Pulse Laserを照射した結果、InGaAs層内部でのAuger再結合過程が極めて明確に観測された。本研究で用いた極短Pulse Laserによって明確に第1ピーク区間と第2ピーク区間の関係性で示された。またAuger再結合依存区間(第1ピーク区間)での時定数解析により、パルス照射直後におけるInGaAs層の電子 - 正孔対面密度は $10E12\text{cm}^{-2}$ を超え、最短消滅時間が $9.95E-11$ 秒であることが計測された。上記の特性を利用することが可能になれば、生活環境

の快適化を強く左右する通信速度は更なる高速化が可能となり、生活環境の劇的な改善の可能性が示唆された。

2. 実験方法

図2に本研究で使用した実験系の概略図を示す。本実験で用いた実験機器で最も特徴的なものは、Calmar社製Fiber Laser, MENDOCINOである。本製品はFiber Laserとして中心波長1550nm、パルス幅100fs (100×10⁻¹⁵秒)を最大強度2.4W、平均パ

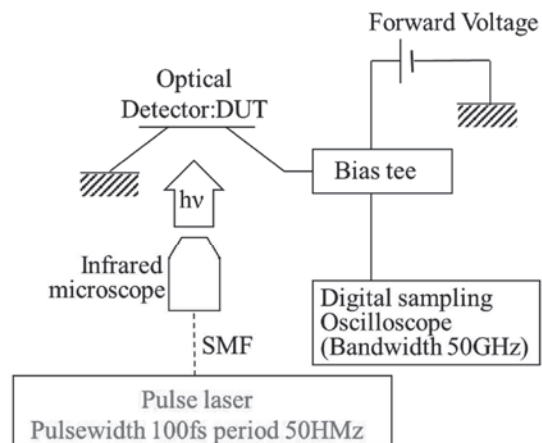


図2 実験系概略図

ルス強度20mWを発生させる。極短かつ強強度Pulse Laserである。本製品をSingle Mode Fiber (SMF)を経由してInfraed microscopeに導入し平行平板ビームを構築した。平行平板ビームはInfraed microscopeを通過した後、直径1.4μmの偏向光となり中空を通過し、Devise Under the Test(DUT)であるOptical Detectorに照射される。今回評価対象としたOptical DetectorはTHORLABS製Mounted InGaAs Photodiode, SM05PD4Aである。光検出層としてInGaAsを持ち、通信波長帯の1550nm光を検知することが可能である。なお形成電極はTi/Pt/Auである。DUTでパルス光は電気パルスと変化し、Bias teeを経由しDigital sampling Oscilloscopeへと信号が導入される。使用したOscilloscopeはHP83480Aで、計測ユニットに50GHz応答対応のHP54752Aを持つ。DUTはパルス光を受けて発生する応答特性は高周波応答となるため、電子系測定計器類は全て高周波応答対応型に設定した。

3. 実験結果

●Optical Detector 直流特性

図3にOptical Detectorの直中特性を示す。Optical Detectorは基本ダイオード構造を持っているため、電流伝達方向が決まっている。図3においてはForward Voltageを正方向とした。直流特性においてForward Voltageが0から0.3V程度のオフセットバイアスが観測されているが、その後Forward方向に良好な直流電流が確認される。Backward Voltageはダイオード構造であれば通常0mAを検知するはずだが、図3にある通りOptical Detectorに導入したPulse Laserの平均強度に依存して電流値の変調が確認される。なお、Pulse Laser強度が0mWの時は、そもそもレーザー照射を行っていない。この時を暗電流という。Pulse Laserの平均強度はこの実験では最高8.037mWとした。パルス

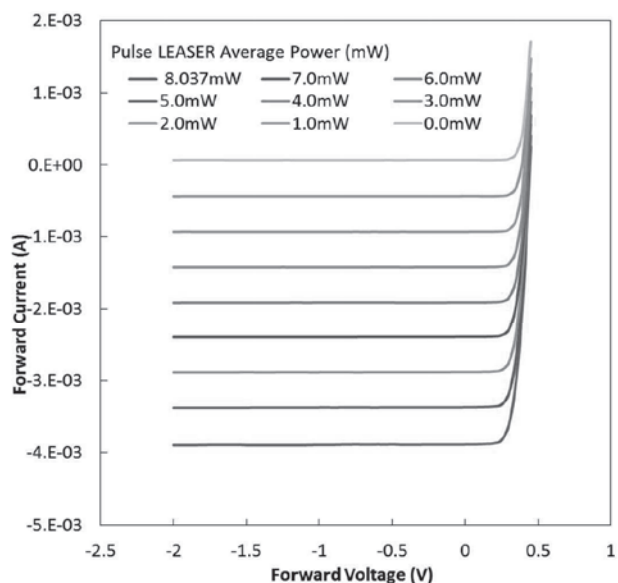


図3 Optical Detector IV特性

光強度は瞬時値では2.4Wとなっており、最大平均値に一致させた場合、Optical Detector自身が強強度パルスによって破壊させる可能性があるため本実験では必要以上に上昇させず8mW弱を設定した。図3にある通りOptical DetectorはPulse Laserの平均強度に対応して負方向電流を検知した。Optical Detectorに中心波長1550nmのPulse光を導入することによって、InGaAs活性層で電子及び正孔が生成される。Detectorに形成されたアノード電極とカソード電極に対して電子はアノード、正孔はカソードに引き寄せられ電流伝達が確認される。今回用いたInGaAsでは生成キャリアとして電子がリッチな状態であったため、結果として負方向電流が検知された。なお電流値はBackward Voltage最大-2Vの範囲において飽和特性を示しかつ安定であった。

さて本IV特性の妥当性を示すため暗電流を利用してInGaAs層と電極を形成するTi/Pt/Au間でのショットキー障壁高さ評価を行った。暗電流飽和値に近似直線を引き、直流電流の漸近線との交点を求めると、逆方向飽和電流 J_s が求まる。本実験では $6.51 \times 10^{-5} \text{A}$ であった。この逆方向飽和電流値は以下の式①で知られる[9]。

$$J_s = S * A^* \exp \left\{ \frac{-q\phi}{kT} \right\} \dots \textcircled{1}$$

上①式においてSは照射面積であり、 A^* はInGaAsのリチャードソン定数、kはボルツマン定数、Tは絶対温度である。なお求めたいショットキー障壁高さは $-q\phi$ で示されている。よって①式より、

$$q\phi = -\frac{1}{kT} \ln \frac{J_s}{SA^*} \dots \textcircled{2}$$

InGaAsのリチャードソン定数を0.55とし、照射面積を直径1.4 μm 円として障壁高さを算出すると0.246eVとなる。文献で知られている数値は0.24eVであり極めて良い一致を見た[10]。よって直流特性に問題はない。

●光応答特性

図4にPulse laser照射時のOptical Detector 応答特性を示す。なお図4は縦軸を直線依存として示す。Pulse laser出力は8.037mW固定とし、Detector側の順方向電圧を0.0Vから4.7mWまで順次変更した。図4において、Detector電圧が0Vの自転で最大0.2V程度 of 出力特性()が確認されるが、暗電流依存の応答特性である。本実験でのDetector電圧依存性は、Detector電圧を上昇させるに従い応答特性の急峻化である。一般的なDetector電圧の応答特性は光照射が行われた直後、活性層のInGaAs層内部で光電変換が行われ電子 -

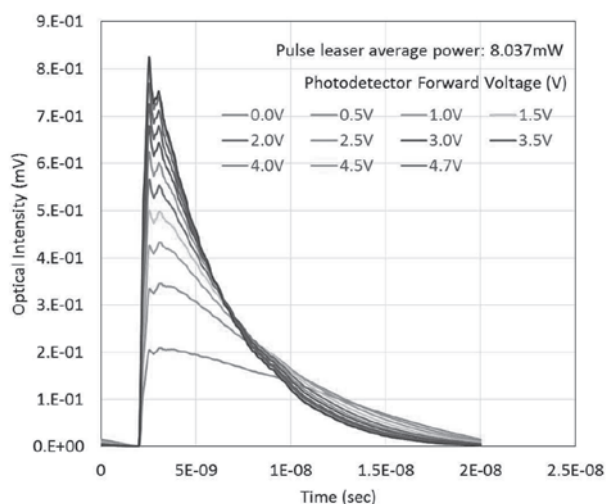


図4 光応答特性：応答出力直線依存

正孔対が急激に生成される。生成された電子はDetectorのAnodeへ、正孔はCathodeへ向かい電流が発生し、Detectorとしては電圧が検知される。InGaAs活性層ではGaAsなどの一般的な化合物半導体に比較して電子正孔とも高速で移動するため生成キャリアは瞬時に電極に収集され応答特性が

検知される。このとき電極への投入電圧を上昇させることにより、InGaAs層への電極が生成する電場影響を強化することが可能となる。結果電極へのキャリア収集能力を向上させることができる。そのため本研究でもDetector電圧を上昇させることによりOptical Intensityが上昇する結果を得た。さて今Optical DetectorにPulse Laserを照射する場合、照射はPulse Laserの半値幅時間のみとなる。Pulse Laserは周期的(本実験では50MHz)に与えられるが、Detector側からみると光照射直後に光OFFの状態が繰り返し周期で与えられていることになる。DetectorにPulse Laserが照射され続けている間、電子 - 正孔対が生成されるためOptical Intensityは上昇を続ける。よってOptical Intensity最大値時点が照射時間終了時であり、その後はInGaAs層中のキャリアがドリフト運動によってAnodeとCathodeに収集されまでが観測されるのであり、このドリフト運動は極めて単純なCR時定数によって決定されるのが常である。単なる過渡応答となるはずである。しかし本実験では特徴的な依存性が確認されている。その事例としてDetector電圧が4.7Vに着目する。Optical Intensityは最大0.825 mVを観測した後、過渡応答に従いIntensityの減衰が開始された。この時を以下では第1ピーク区間と表現する。第一ピークの2.73E-10秒後に再度上昇を行い、ピーク強度0.747 mVを観測した。ここを第2ピーク区間と表現するその後今度は過渡応答に従いOptical Intensityは減衰を開始し、2E-8秒で応答は終了した。このOptical Intensity最大時点での2つのピーク観測はその明確さには差があるものの、いずれのDetector電圧でも観測された。本件に関する考察を次項に示す。

4. 考察

図5に図4で示した光応答特性の縦軸を自然対数(LN関数)依存に切り替えた図を示す。縦軸を自然対数依存として図を切り替える理由は、Optical Intensityの減衰が過渡応答に従うというのであれば、よく知られた以下③式に従うはずだからである[11]。

Optical Intensity =

$$A_1 \text{Exp} \left(\frac{t}{\tau} \right) \dots \textcircled{3}$$

③式において A_1 は定数、 t は時間軸、 τ はCR時定数である。このときの時定数は電子 - 正孔対の消滅時間に依存する。通常であればDetector電極にキャリアが収集されるまでのドリフト運動に依存した定数となる。さて③式にOptical Intensityが依存すると考えると、Optical Intensityは横軸を自然対数に取った場合、単純な直線関数で示されなければならない。これを踏まえて図5を確認する。なお

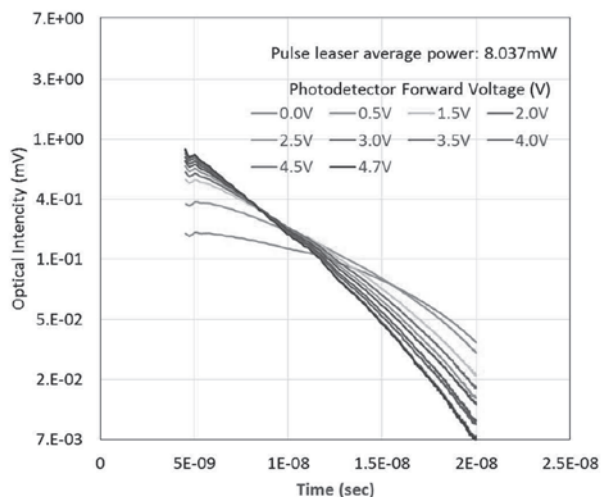


図5 光応答特性：応答出力LN依存

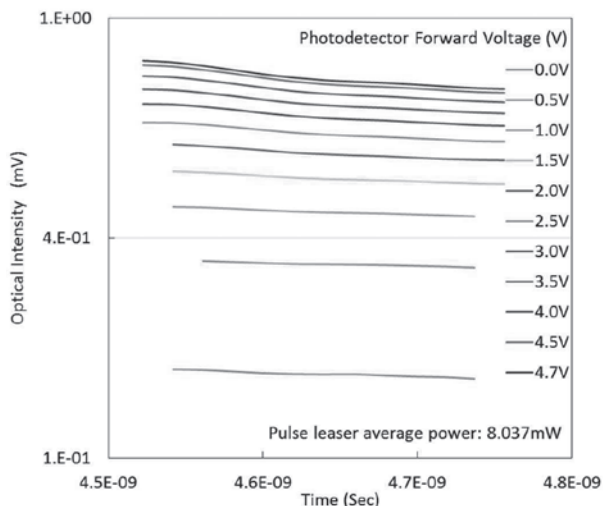


図6 光応答特性(第1ピーク)LN依存

図5で横軸を自然対数に取るため、Optical Intensityの上昇過程を割愛した。図5にある通り、Optical Intensityの直線依存は確認されない。明らかに曲線である。つまり③式には従っていない。さてここでOptical Intensityを二つに分けて考える。第1ピーク区間と第2ピーク区間である。図6に光応答特性(第1ピーク区間)のLN依存を示す。第1ピーク区間が存在する時間軸が $3E-10$ 秒(データ群は最大14個)であるため今回用いた測定系では観測限界に近い。それでも第1ピークに属するデータは自然対数に対し

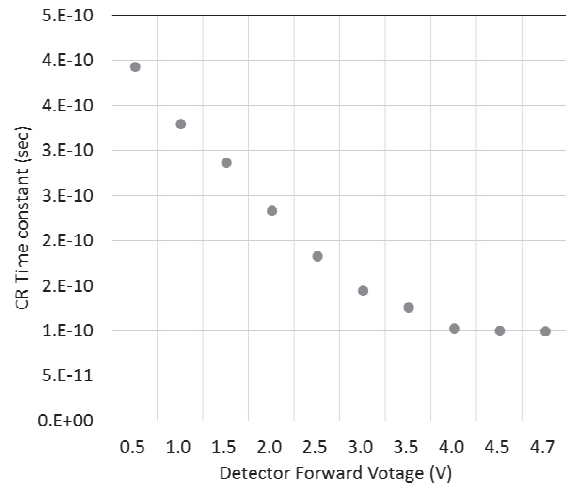


図7 第1ピークにおけるCR時定数の電圧依存

て直線的応答特性を示した。つまり第1ピークでは単純な過渡応答に近似できる応答特性をもって電子 - 正孔対が消滅したことが十分に想定される。しかし応答時定数時間は単純計算でも $3E-10$ 秒以下である。電子 - 正孔対が電極に収集された結果を言えるかどうかを判断するためCR時定数 τ を算出した。図7にその結果を示す。図7より第1ピーク区間ではCR時定数はDetector電圧増加に従い減少する傾向が確認された。最短時間はDetector電圧4.7V時の $9.95E-11$ 秒であった。通常CR時定数は使用した回路固定の定数であり、電圧依存は持たない。図7が示す時定数応答は第1区間における電子 - 正孔対消滅原理は互いのキャリアがDetector電極に収集された結果ではなく、他の因子の可能性を示している。InGaAs層内部におけるキャリア消滅過程を考察する必要性が示された。さてInGaAsという結晶は先に示した通り超高速応答デバイス (HEMT) にも使用される[8]。このHEMTでは高周波領域において周波数分散が発生し急激に電流値が減少することが報告されており、原因はInGaAs層内部における電子 - 正孔対のAuger再結合に依存することが示されている。このAuger再結合はInGaAs層内部での生成キャリア量に依存する。文献よりInGaAs層内部での

キャリア面密度(P_s)とキャリア寿命時間の関係図を図8に示す[12]。図8においてキャリア寿命時間が $10E-10$ 秒レベルの領域では、キャリア消滅則はAuger再結合(CHSH過程)に強依存していることが分かる。図8を用いて第1ピーク区間における電子 - 正孔対の消滅原理を考察する。強強度Pulse Laser照射に伴いInGaAs層内部で急激に電子 - 正孔対が生成される。その生成量が面密度で $10E12\text{ cm}^{-2}$ を超えて、生成と同時に急激にキャリアがAuger再結合CHSH過程にて消滅する。急激なキャリア減衰が瞬時に発生し表面面密度が $10E11\text{ cm}^{-2}$ 以下となり、その後は過渡応答に従いキャリア減衰がなされたと想定される。

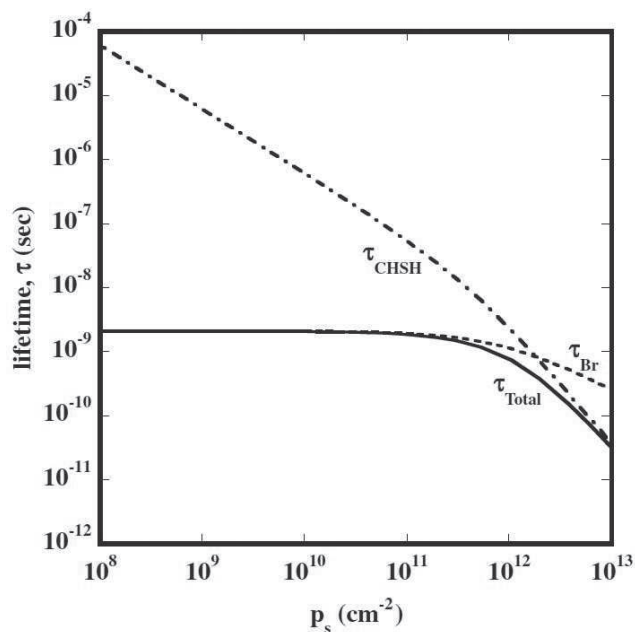


図8 InGaAs層内部におけるキャリア面密度(P_s)とキャリア寿命時間の依存性[12]

従って第2ピークはAuger再結合によってInGaAs層内部で電子 - 正孔対が消滅した後に、残存キャリアがドリフト運動によりDetector電極に収集され、その収集量の再検出によってIntensityが再度上昇したものと想定される。よって第2ピーク以降の応答特性はAuger再結合による消滅関数と、ドリフト運動によるキャリアの電極収集過程関数が重なり合い、③式に示される一元関数依存では表現が出来なくなり自然対数依存からずれて曲線応答になったことが考察される。

上記考察は生活環境改善を目的とした通信環境高速化のため、通信デバイスがどのような構造であるべきかと示唆している。通信素子、特に光通信の送受信デバイスが通信速度を律速している。送受信デバイスの超高速化は光通信のさらなる拡張を意味し、ユビキタス社会に強依存で構築されている現代人とその生活環境の改善に十分寄与する。現時点で送受信デバイスに存在する通信速度のボトルネック拡張のためには、InGaAs層で特徴的に発現するAuger再結合を利用し、瞬時にキャリアを消滅させることが光応答特性の超高速化に寄与することが予見される。上記を目的とし、①高効率でのAuger再結合現象の発現、②InGaAs層での面電荷密度の向上(量子構造の検討)、③高周波対応型回路モデルの検討、以上③点が今後の課題として挙げられる。

5. 結論

本研究においてInGaAs層を活性層にもつOptical Detectorに、パルス幅100fsの極短Pulse Laserを照射した結果、InGaAs層内部でのAuger再結合過程が極めて明確に観測された。これまでの研究においてはAuger再結合によるキャリア消滅過程とその後のInGaAs層内部におけるキャリアのドリフト運動による消滅過程が光照射時間の過大が原因でオーバーラップし明確に観測が出来なかったが、本研究で用いた極短Pulse Laserによって明確に第1ピーク区間と第2ピーク区間の関係性で示された。またAuger再結合依存区間(第1ピーク区間)での時定数解析により、パルス照射直後におけるInGaAs層の電子 - 正孔対面密度は $10E12\text{cm}^{-2}$ を超え、最短消滅時間が $9.95E-11$ 秒であることが計測された。上記の特性を利用することが可能になれば、生活環境の快適化を強く左右する通信速度は更なる高速化が可能となり、生活環境の劇的な改善の可能性が示唆された。

6. 参考文献

- [1] A. Takahashi, et. Al, J. Mag. Soc. Jpn., vol. 22, No. S2, 1998.
- [2] Wang Hai, International Conference on Intelligence Science and Information Engineering (ISIE), pp.167-170, 2011.
- [3] 服部 武、藤岡 雅宣、諸橋 知雄著、“4GLTE/LTE-Advanceのすべて 上巻”丸善出版、初版、pp-19-28, 2015
- [4] Hirohisa Taguchi, et. Al, “Dependence of Carrier Lifetime of InAlAs/InGaAs High-electron-mobility transistors on Gate-to-Source Voltage” JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Vol. 47, No. 4, 2858, 2008
- [5] Hirohisa Taguchi, et. Al, “Analysis of minority carrier lifetime for InAlAs/InGaAs high electron mobility transistors by using 1.55- μm femto-second pulse laser” physica status solidi (c) Vol. 5, No. 9, 2791, 2008
- [6] Hirohisa Taguchi, et. Al, “Ultrafast Optical Response of InAlAs/InAs/InGaAs Pseudomorphic

- High Electron Mobility Transistors” JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Vol. 49, No. 4, 04DF03, 2010
- [7] Arman-Ur-Rashid, et. Al., “Analytical modeling and simulation of subthreshold behavior of dual material gate (DMG) Al_{0.7}Ga_{0.3}Sb/InAs HEMT” 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATICS, ELECTRONICS & VISION, 978- 1- 4799- 5180- 2/14/\$31.00, 2014
- [8] Yuta koreeda, et. Al., “Characteristics of PHEMTs and MSM photodetectors simultaneously fabricated on the same epitaxial wafer with In_{0.75}Ga_{0.25}As/InGaAs channel layer” Physica Status Solidi (c), Vol. 9, No. 2, pp.357-360, (2012.02)
- [9] S. M. Sze, “Physics of Semiconductor” Wiley-Interscience, 3ed Edition, pp-440, 2007
- [10] D.V. Morgan, “Increasing the effective barrier height of Schottky contacts to n-In_xGa_{1-x}As” , Electronics Letters, Vol. 14, No, 23, p. 737 – 739, 1978
- [11] Hirohisa Taguchi, et. Al., “Optical Responsivity of MSM photodetectors fabricated on the In_{0.53}Ga_{0.47}As epitaxial HEMT Structure layer” Proceedings of 1st International Conference on Electrical Engineering and Applications MIC-Electrical 2014, 50C-906-1-5, 2014
- [12] Hirohisa Taguchi, et. Al, “Frequency Dependence of Drain Conductance due to Hole Accumulation in InAlAs/InGaAs High Electron Mobility Transistors” JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS Vol. 45, No. 6A, 4960, 2006