

光ファイバグレーティング

工業技術院

電子技術総合研究所 粟津浩一

Bragg-grating-based optical waveguide filters

Koichi Awazu

Electrotechnical Laboratory

Abstract

Bragg reflection gratings building up has attracted interest as novel non-linear optical properties of SiO_2 : GeO_2 glass. Presence of optical absorption band centered at 5eV is indispensable for emergence of this function. In this article, recent works on optical properties of the 5eV band and structural models for the responsible defects was reviewed.

1. ファイバグレーティングの現状

1.1 はじめに

光通信技術の発展に伴い、高度な光通信システムの開発が必要となっており、それに伴い、高度な光学部品の開発も要求されている。中でも、ファイバー型光学部品である光ファイバグレーティングは、光ファイバー内にブラッググレーティング (Bragg grating) を形成し、特定波長のみを反射させることができる光学フィルターで、従来の光ファイバー製造のノウハウがそのまま使えること、光ファイバーとの接合性がよく、挿入による損失も少ないというメリットがあることから、光機能部品として光線路への導入が進められている。本解説では、前半で、ファイバグレーティングについてこれまでの研究を紹介し、後半で最近の著者の研究について紹介する。

1.2 ファイバグレーティングについての簡単な紹介

応用例として提案されているものを2例、紹介しよう。図1(a)は、光ファイバグレーティングを用いた、波長多重通信用光部品である〔1〕。様々な波長の信号が送られてくる中(ここでは、 $\lambda_1 \sim \lambda_3$)から λ_1 のみを取り出す光学部品であるが、図のように λ_1 の波長に相当する間隔でグレーティングを刻んだファイバーを接合することで(2)側から λ_1 が、それ以外の信号は(4)側から取り出せる。

図1(b)は、分散補償を行う光部品である〔1〕。チャープ型グレーティング、すなわち、図のようにグレーティングの間隔を、少しずつ変化させて書いた光ファイバーで、入力光のパルス圧縮を行うことを、目的としている。

これら光部品は、所望する信号光を高効率で分離することが必要で、それには、高い反射率(高い屈折率差)、広い半値幅を持つものが要求される。高い反射率はグレーティング長を長

1. 3 グレーティング作成方法

グレーティングの書き込み方法として、幾つかの方法が提案されているが、最初に Hill が行ったのは、コア中を伝搬するArイオンレーザー光と、端面からの反射光の干渉によって生じる定在波を用いて、周期的な屈折率変化を形成するものであった〔2〕。この方法では、上述のニーズ、すなわち、任意のピッチのグレーティングを書くことは無理であるが、Melts らの2光束干渉法〔3〕や Anderson らの位相格子法〔4〕では、それが可能となる。詳しくは、参考文献〔3〕〔4〕を参照されたい。

1. 4 高屈折率化の原因

ファイバグレーティングの研究はデバイス主導で行われており、メカニズムに関する報告は少ないが、Reviewを兼ねて幾つかをここで紹介する。まず、この光誘起反応はGeドープa-SiO₂でよく知られている5 eV光吸収帯（後述）を励起することで生じることが、Arイオンレーザーの2光子吸収による実験〔5〕、UVランプによる1光子吸収の実験〔6〕により、確認されている。このことは、5 eV帯に吸収を持つ欠陥種が、光誘起屈折率上昇の前駆体であることを意味する。

5 eV帯は紫外光照射によりブリーチされ、代わりに紫外から真空紫外域に強い吸収が現れることが、古くより知られている〔7〕。Atkinsらは、光ファイバーの場合、光誘起吸収が高屈折率化の原因であることをクラマース、クロニーヒ(K-K)の関係を用いてほぼ説明がつくとしている〔8〕。しかし、スパッタ膜〔9〕、Geイオン注入で作成したGeドープa-SiO₂等〔10〕、特殊なものの場合、K-Kの関係のみでは説明がつかず、圧縮モデル、すなわち膜自身が緻密になっているというモデルを併用する必要がある〔11〕。

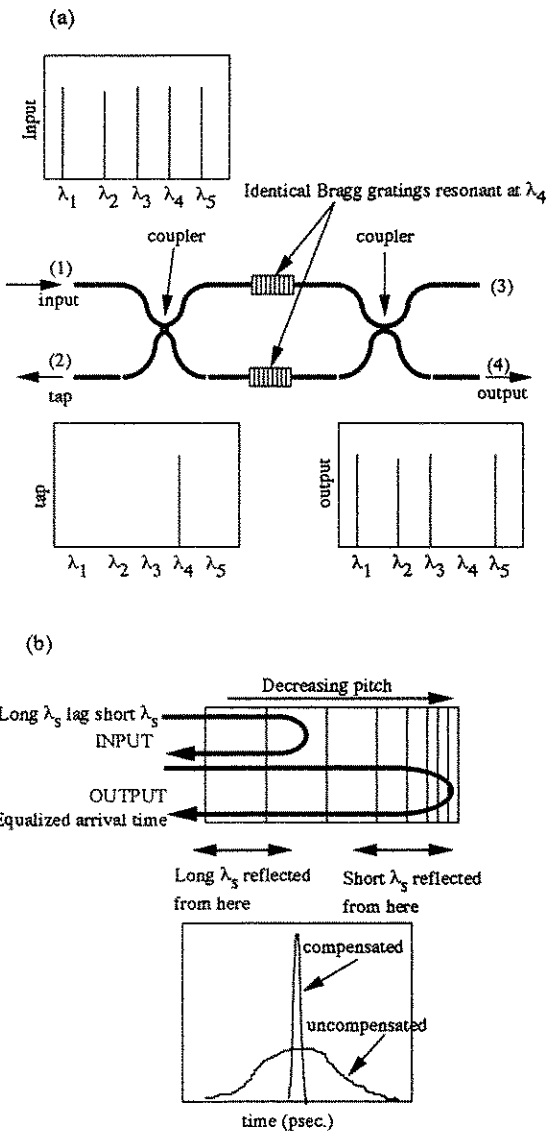


図1 Application of fiber gratings
(a) Bragg grating based tap and combiner
(b) Principle of dispersion compensation using a periodic Bragg grating

くすることでも得られるが、この場合、反射の半値幅が狭くなるため、信号光の線形に影響を与えるので、やはり高い屈折率差で短いグレーティングが必要となる。

1. 5 5 eV帯を与える欠陥は2種類ある!

5.14eV (242nm)吸収帯に関する最初の報告は、Garino-Canina による1954年までさかのぼる〔12〕。また、先の5.14eV帯とは別物の5.06eV帯もあること、290nmと400nmの2つの発光帯があることもGarino-Canina によって報告されている〔13〕。

次の研究的飛躍は、Yuenによってなされた〔14〕。5.14eV帯のモデルとしてGeO ガス分子〔15〕との類似性を挙げており、初めて構造モデルが提案された。このモデルは今日も支持されている。蛇足であるが、この論文中で、185nm帯が報告されているが、Yuenのこの論文の他にこの吸収帯の報告例はない。光学系が簡便なものであり、真空紫外域の特性が充分、引き出せてなかったのではないだろうか。現在の同様のサンプルを参考にすると、185nmより真空紫外域へと単調に延びる強い吸収があると考えられる〔16〕。

2つの5eV帯、5.14eVと5.06eV帯は、ピーク位置が近接しているため、光吸収測定で識別するのは困難であるが、5eVで励起したときの発光ピークがそれぞれ3.2eV、4.4eVと異なるので、蛍光スペクトル測定で分離できることもわかっている〔17〕〔18〕。

以上は、定性的議論であるが、定量的な議論をした論文が90年代に入るとでてくる。著者らは、5.14eV帯を二配位のGeで孤立電子対であるGLPC (Ge lone pair center)と提案し、水素との反応から吸収断面積として、 $\sigma = 2.5 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ という値を得た〔16〕。この値は、GeOガス分子の値とほぼ同じである〔19〕。

5.06eV帯については、最近、Hosonoによってモデルの提案、量的議論がなされている〔20〕。5eV帯のうち、5.14eV帯は紫外光でブリーチされず、5.06eV帯のみがブリーチされること、そのときGe E' センターが生成することから、 $\equiv\text{Ge}---\text{Ge} \equiv \rightarrow \equiv\text{Ge} \cdot + \text{e}^-$ という光化学反応式が提案されている。この式

とESR測定により実測したGe E' センター濃度から5.06eVに光吸収帯を持つ、中性酸素欠乏欠陥 ($\equiv\text{Ge}---\text{Ge} \equiv$; Neutral Oxygen Vacancy; NOV)の濃度や吸収断面積を見積もっている。

1. 6 光源依存性

5eV光照射に関する論文を読む際、注意が必要なのは、同じ波長の光源を使っているのにも関わらず、結果の違いが見られることである。これは、バンド間遷移のない、1光子過程のみの光源(ランプ)〔6〕、2光子過程によって初めて5eV帯の励起が行える光源(Arイオンレーザー)〔2〕〔5〕、そして5eV励起のみでなく、2光子過程によるバンド間遷移を含む光源(エキシマレーザー)〔8〕〔21〕といった違いに起因すると思われる。

また、最近、真空紫外域の励起でも屈折率が上昇することが報告されているが〔22〕、これは、上記のメカニズムを否定する結果とはならず、屈折率上昇には、複数の前駆体があるということを示しているにほかならない。後者のメカニズムに関してはまだ不明である。

2. 最近の著者らの研究

2. 1 研究のモチベーション

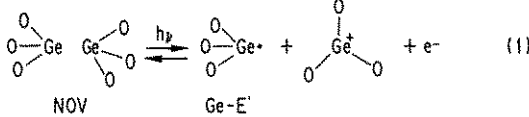
高い屈折率(反射率)を得るための研究開発としては、昨年、AT&Tベル研究所のグループにより、高圧水素処理をした光ファイバーで、屈折率上昇数%という大きな変化が確認されている〔23〕。以下は著者らが行ったこの現象のメカニズムの解明に関する最近の研究成果を紹介したい。

2. 2 提案する反応モデル

提案した光化学反応モデルは以下のとおりである。

図2の(1)は、Hosonoらにより提案された光化学反応で、水素が存在しない系では、中性酸素欠乏欠陥(NOV)が光解離するという反応である〔20〕。この反応は平衡反応であるので、時間

1. H₂処理していない場合の光化学反応



2. H₂処理した場合の光化学反応

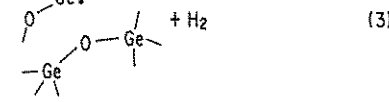
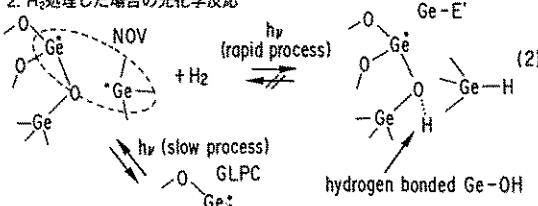


図2 Model of photochemical reactions in Ge doped a-SiO₂.
 (1) denotes the reaction of the neutral oxygen vacancy (NOV).
 (2) and (3) denote the reactions of the NOV and Ge lone pair center (GLPC) with H₂ molecules trapped in glass.

とともに飽和してしまう。ところが、水素分子を高圧で押し込んだ系では、(2)式のようになる。この場合、水素によりGeが終端されるので(1)式と異なり、逆反応が起こりにくく、順方向の反応は早い。また、(2)式の反応より少し時間的に遅れて二配位のGeで孤立電子対であるGLPC (Ge lone pair center) がマトリックス中の水素分子と反応し、中性酸素欠乏欠陥 (NOV) に変わる (3)式)。この一連の反応モデルをたてた経緯をさらに詳しく、以下に紹介する。

2. 3 試料及び実験内容

試料として10GeO₂:90SiO₂、5GeO₂:95SiO₂、1GeO₂:99SiO₂の3種類を垂直軸付け法 (VAD法) にて作成した。高圧水素処理は200atmで2週間、室温にて行った。光照射はXe/Hg ランプを用いた。

2. 4 実験結果

2. 4(a) 光吸収と蛍光

図3は10GeO₂:90SiO₂ サンプルの光吸収スペ

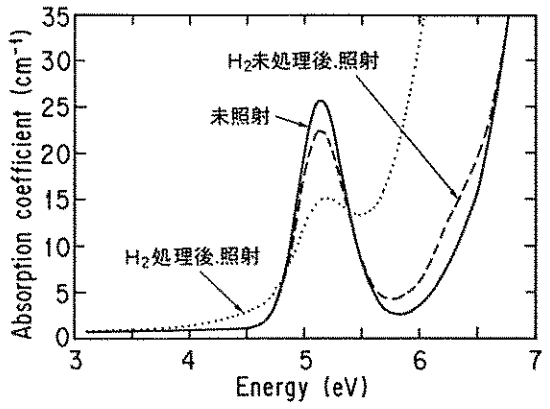


図3 Change of optical absorption spectra of 10GeO₂:90SiO₂ glass with duration of illumination. Solid line shows the spectra of the as-received sample and H₂ loaded one. Both lineshape are almost same in this scale. Long dashed line and dotted one show the spectra of as-received sample and H₂ loaded one with the 7hr illumination, respectively.

クトルである。何も処理を施していない試料の光照射前後のスペクトルをそれぞれ実線、長い破線で示した。5.18eVにピークを持つ光吸収帯がブリーチされ、6-6.5eV域に吸収が誘起されている。次に水素処理を施した試料の光照射前後のスペクトルを実線、点線で示した。高圧水素処理だけでは光吸収スペクトルに何の変化も見られないが、光を照射すると、水素処理を施していない場合に比べて、極めて大きな変化、すなわち5eV吸収帯の大きな減少と真空紫外域の大きな吸収増大を示していることがわかる。先に述べたとおり、K-K変換による検討から、この強い吸収が高屈折率の原因であるとされている。

次に蛍光スペクトル測定を行うことでGLPC (Ge lone pair center) とNOV (Neutral Oxygen Vacancy) の分離を行った。図4は、5.18eV光励起の蛍光スペクトルであり、実線は光照射前のもので、水素処理の有無は関係なく同じ線形となる。Geの孤立電子対 (GLPC)、中性酸素欠乏欠陥 (NOV) に帰属される二つの発光ピークが確

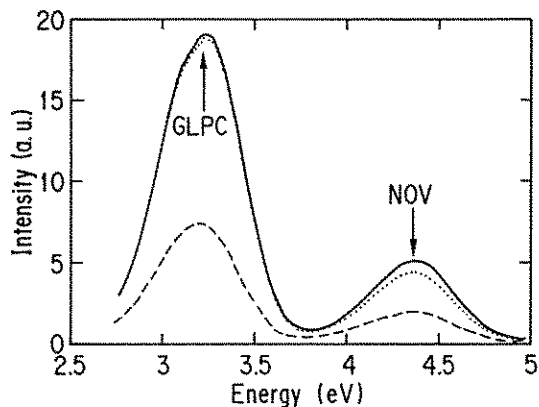


図4 Photoluminescence spectra with excitation at 5.18eV. Solid line denotes the spectra of the as-prepared sample and H₂ loaded one. Difference of each spectra is within the error. Dotted and dashed lines denote the spectra of as-received sample and H₂ loaded one before illumination, respectively.

認できる。点線、長い破線はそれぞれ水素処理していないもの、してあるものの光照射後のスペクトルである。まず、水素処理していないものは、光照射によって中性酸素欠乏欠陥 (NOV) がブリーチされているのに対し、Geの孤立電子対 (GLPC) の変化は見られない。これに対し、水素処理したものは、中性酸素欠乏欠陥 (NOV)、Geの孤立電子対 (GLPC) とも大きくブリーチされているのがわかる。

2. 4(b) 5 eV帯とGe-E' センターの関係

光吸収測定と同時に電子スピン共鳴 (ESR) スペクトルを測定すると、GeのダングリングボンドであるGe-E' センターとGeの電子捕獲中心であるGEC (Ge electron center)が検出された [24]。最近のパソコンの進歩によりこの2種を分離し定量することは、極めて容易になった。この分離によって見積もられたGe-E' センターの濃度と5 eV帯の吸収係数の減少量の関係を示したのが、図5である。□と●のプロットはそれぞれ10GeO₂:90SiO₂の水素処理を施していないもの、施したものの、光照射時間を変えながら

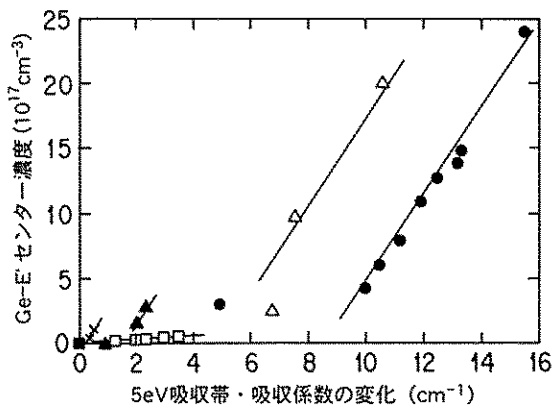


図5 Relationship between absorption coefficient at 5eV and concentration of Ge E' center with duration of illumination in 10GeO₂:90SiO₂ glass. Open squares and closed circles denote the data of as-received samples and H₂ loaded ones, respectively. Open triangles, closed triangles, and crosses denote the data of O₂ treated 10GeO₂:90SiO₂ glass for 1day, 9days and 12days at 1000°C, respectively.

とったデータである。

水素処理していないものからみてみよう。このプロットは原点を通る一直線上に載っていることがわかる。この解釈については、定量的議論が、既に先に紹介した細野らによりなされており、すなわち中性酸素欠乏欠陥 (NOV) 1つが、Ge-E' センター1つに解離する光化学反応、図2(1)と考えられている。

次に、水素処理したもののデータ (●) について考えてみたい。この場合、□の直線から大きくはずれており、すなわち先の(1)式のモデルでは説明がつかないことがわかる。そこでもう一度、図4の結果を振り返ってみよう。水素処理をしていない場合は、中性酸素欠乏欠陥 (NOV) のみの反応で説明がつくが、水素処理をしたもの場合は、中性酸素欠乏欠陥 (NOV) のみでなく、Geの孤立電子対 (GLPC) も、光化学反応していたことを思い出していただきたい。●の直線関係はGLPCがGe-E' センターに変化するというモデルが考えられるが、この作業仮説

が濃度的にあうか否か、Geの孤立電子対(GLPC)の5 eV吸収帯での吸収断面積の値〔16〕、 $\sigma = 2.5 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ を使って検証してみよう。データ(●)の傾きからGLPC濃度減少量は $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、この時のE'センター生成量は $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ となり、濃度の点からGLPC→Ge-E'であることがわかる。

2. 4(c) 5 eV強度の異なる試料の場合

次に、同一サンプルで5 eV帯の強度を変化させたサンプルに水素処理を施し、光照射を行ってみた。5 eV強度は、試料を高温酸素雰囲気中で焼成することで自在に変化させることが可能で〔16〕、1000℃ 1日、9日、12日の処理条件で5 eV強度は未処理のものが吸収係数 22 cm^{-1} であったのに対し、それぞれ 17 cm^{-1} 、 2 cm^{-1} 、 0.5 cm^{-1} となった。以下、initial、O₂1d、O₂12dと呼ぶ。この4種類のサンプルを水素処理して、光照射を行い、5 eV吸収係数の変化とESRより見積もったE'センターの濃度の関係を再度、図5に示した。△、▲、×はそれぞれO₂1d、O₂8d、O₂12dサンプルに高圧水素処理を行い、光照射を行った場合のデータである。いずれのプロットの傾きも同じであり、このことは1GLPC → 1Ge-E'を意味し、モデルを裏付けている。一方、立ち上がりがずれているのは、各サンプル中の中性酸素欠乏欠陥(NOV)の濃度が異なるためであると考えている。

2. 4(d) 光誘起現象

まず、水素が存在しない場合の光化学反応であるが、中性酸素欠乏欠陥(NOV)が光解離する図2(1)の反応で説明できる。

次に水素存在下での光化学反応の場合は、初期において(2)の反応が起こる。この反応の反応(1)と異なる点は、水素が生成した欠陥種をターミネイトするため、逆反応がおこりにくく、極めて早く(5分程度)終了する。5分以上照射していると、Geの孤立電子対(GLPC)1つが減り、Ge-E'センター1つに変化する反応が起き

る(3)。問題はGLPCからは、単純にはGe-E'センターには変化しないことである。しかしながら、Geの孤立電子対(GLPC)の側には必ず隣接して酸素原子が存在しており、(3)に示す通り、Geの孤立電子対(GLPC)がネットワーク中の水素と光化学反応をおこし、中性酸素欠乏欠陥(NOV)に変化すると考えられる。この時のGe-O結合が一ヵ所入れ替わるだけで、Geの孤立電子対(GLPC)からNOVに構造変化がおきることに注目してほしい。この変化は光のみではおこらず、水素を介在した光化学反応である。また、Geのドーピング量が10mol%と少ないのに図2の構成要素をSiでなくGeと書くのは、不自然に思われるかもしれないが、光ファイバー用プリフォームロッドの場合、GeO₂とSiO₂の均質度は極めて悪く〔25〕、GeO₂は局在化していることが知られているため、このように記した。(にも関わらず、伝送損失はほぼ理論限界に到達しているのは驚異である。)

2. 4(e) Ge濃度の異なる試料での実験

1GeO₂:99SiO₂、5GeO₂:95SiO₂を用いて同様の水素処理の実験を行ったのが図6である。□、●、△はそれぞれ10GeO₂:90SiO₂、5GeO₂:95

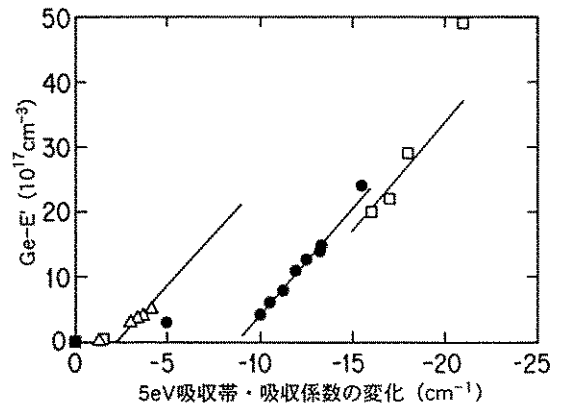


図6 Relationship between absorption coefficient at 5eV and concentration of Ge E' center with duration of illumination. Squares, circles, and triangles denote the data of, 10GeO₂:90SiO₂, 5GeO₂:95SiO₂, and 1GeO₂:90SiO₂ glasses, respectively.

SiO₂、1GeO₂:99SiO₂のデータである。このサンプルの傾きも図5と同じであり、1GLPC → 1Ge-OHを意味する。

2. 4(f) ガラス中の水素の状態

図7は、10GeO₂:90SiO₂の光照射前のスペクトル(a)、水素処理による赤外吸収(IR)の変化を表すスペクトル(b)、及び光誘起による変化を表すスペクトル(c)である。(b)(c)は、初期状態(a)を引いた、差スペクトルになっている。高圧水素処理を行ってもIRスペクトルに何等変化は見られなかったが(b)、光照射により、3550cm⁻¹にピークを持つ、ブロードな吸収と2150cm⁻¹にピークを持つ2つの吸収が現れる(c)。前者の3550cm⁻¹帯はGe-OHに、それより低波数側の裾は、水素結合したOHに帰属されている[26]。また、2150cm⁻¹は孤立したGe-Hに帰属されている[27][28]。これらは、確かに提案したモデルの中に現れており、定性的には正しいことがわかり、後は定量的に合えば、モデルを裏付ける有力な証拠となる。

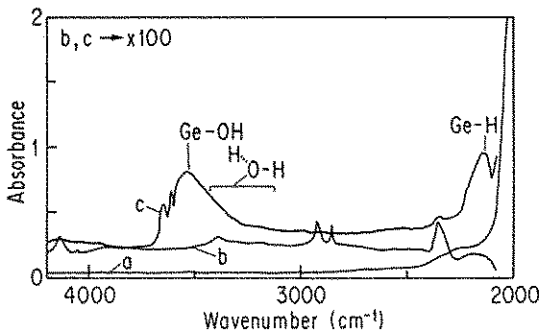


図7 Infrared spectrum of 10GeO₂:90SiO₂. (a) shows the spectrum of as-received sample. Reference of the spectrum is air. (b) and (c) show the spectra of H₂ loaded sample without and with UV illumination for 7hours by using of as-received sample as a reference.

図8は本研究で使用したサンプルの、5eVの吸収係数より見積もったGLPC濃度と、IR測定より見積もったOH濃度、Ge-H濃度の関係を示した

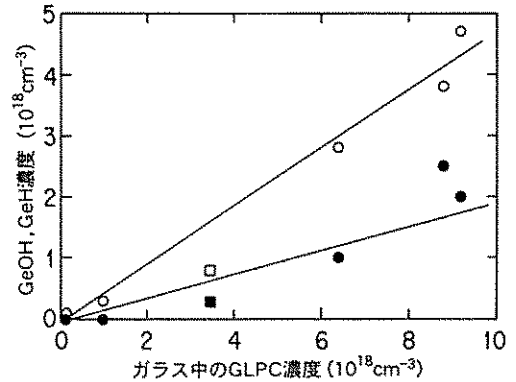


図8 Relationship between concentration of Ge lone pair center (GLPC) and concentration of Ge-OH, Ge-H induced by UV illumination. ○ and □ denote the data of Ge-OH in 10GeO₂:90SiO₂ and 1GeO₂:99SiO₂, respectively. ● and ■ denote the data of Ge-OH, Ge-H in 10GeO₂:90SiO₂ and 1GeO₂:99SiO₂ glasses, respectively.

ものである。Ge-OHとGe-Hの吸収断面積は、Si-OH、Si-Hのそれを参考にした[29][30]。○、□はそれぞれ、10GeO₂:90SiO₂、1GeO₂:99SiO₂のGeOH濃度、●、■はそれぞれ、10GeO₂:90SiO₂、1GeO₂:99SiO₂のGeH濃度を示す。いずれも、原点を通る直線上にのること、GLPC濃度、OH濃度、Ge-H濃度はオーダー的にあることがわかる。このことは、OHやGe-Hの生成にはGLPCが関係していることを意味する。また、GLPCに比べOHやGe-Hは、半分程度の濃度になっている。これは、図2の(2)の最後の反応でOHやHが更に光解離するなど、単純でない次の反応が起きているためと思われる。

2. 4(g) 高温水素処理との比較

さて、高圧水素処理でなく、高温で処理した場合はどうなるのであろうか。400℃、600℃の処理を行い、光照射を行ってみた。5eV帯のブリーチ量は若干増大するものの、高圧水素処理の場合ほどではなかった。しかしながら、この場合水素は、T-OHやT-H (T=GeまたはSi)と

いう形で 10^{19}cm^{-3} のオーダーでネットワークに入っているのである。一方、水素分子のシリカガラスへの溶解量は報告されており、室温 [31]、 400°C [32]、 600°C [32] でそれぞれ、 $4.2\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 、 $3.3\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 、 $2.5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ と、室温における溶解度は高温の場合より2桁大きいことがわかる。このことから、反応に寄与するのは水素分子であり、ネットワークと結合した水素(T-OHやT-H、T=GeまたはSi)では、このような光化学反応はおこらないことがわかり、この事実も我々のモデルを強力にサポートする。

3. まとめ

デバイスの研究が先行する形で本分野は急速に進歩している。しかしながら、著者が国際会議等を通じてデバイスの研究者達から言われるのは、デバイスの進歩に材料科学が不可欠であるということである。著者の研究により、より高い屈折率を光誘起するには、より水素分子を高濃度ガラス中に押し込むこと、5 eV吸収係数をさらに大きくすること、といった今後の指針が得られたと思っている。また、光ファイバー黎明期には、光ファイバー敷設後、数ヶ月でSi-OH、Ge-OHがファイバー内に形成され、伝送不能に陥る現象が見られた。このメカニズムは迷宮入りになっているが、本研究が一つの謎解きの鍵になるかもしれない。

参考文献

[1] K. Hill, OFC' 95, p145 (1995).
 [2] K. Hill et al., Appl. Phys. Lett., 32, 647 (1978).
 [3] G. Melts et al., Opt. Lett., 15, 823 (1989).
 [4] D. Anderson et al., OFC' 93, pd16-1.
 [5] K. Simmons et al., Opt. Lett., 16, 141 (1991).
 [6] G. Melts et al., Opt. Lett., 11, 516 (1986).

[7] A. Cohen et al., J. Phys. Chem. Solids, 7, 301 (1958).
 [8] R. Atkins et al., Electron. Lett., 29, 385 (1993).
 [9] J. Nishii et al., Appl. Phys. Lett., 64, 282 (1994).
 [10] J. Albert et al., Opt. Lett., 17, 1654 (1992).
 [11] J. Bernardin et al., Opt. Commun., 79, 194 (1990).
 [12] V. Garino-Canina, Academie de Sci., 12, 1577 (1954).
 [13] V. Garino-Canina, ibid, 240, 1331 (1954).
 [14] M. Yuen, Appl. Opt., 21, 136 (1982).
 [15] B. Meyer et al., J. Mol. Spectrosc., 37, 100 (1971).
 [16] K. Awazu et al., J. Appl. Phys., (1990).
 [17] M. Kohketsu et al., J. Non-Cryst. Solids 95 & 96, 679 (1987).
 [18] M. Kohketsu et al., Jpn. P. Appl. Phys., 28, 622 (1989).
 [19] G. Inoue et al., unpublished data.
 [20] H. Hosono et al., Phys. Rev. B46, 11445 (1992).
 [21] V. Mizrahi et al., Electro. Lett., 28, 2210 (1992).
 [22] J. Albert et al., Opt. Lett., 19, 387 (1994).
 [23] A. Vengsarker et al., OFC' 94, 48 (1994).
 [24] Y. Watanabe et al., Jpn. J. Appl. Phys., 25, 245 (1986).
 [25] G. Atkins, et al., IEEE Photonics Tech. Lett., 4, 43 (1992).
 [26] M. Hair, J. Non-Cryst. Solids, 19, 299 (1975).
 [27] SiまたはGe (以下Tと表す)と、孤立したT-H(以下iso型)と一つのTに2つ (以下33頁の下段へ続く)

(29頁からの続き)

の水素が結合したT-H(以下gem型)の2種類がある。これらの与えるIR吸収(またはラマン散乱)ピークは、iso型の方がgem型よりも低波数側にピークを持つ。例えば、T=Siの場合、iso-Si-H, gem-Si-Hはそれぞれ 2230cm^{-1} , 2300cm^{-1} となる[C. Morterra et al., J. Phys. Chem., 73, 327 (1969).]。

T=Geの場合、やはりiso型の方がgem型よりも低波数側にピークを与える。[G. Nakamura et al., Jpn. J. Appl. Phys., 20, Suppl. 20-1, 291 (1981).ただし、この場合はa-Ge:Si中の例のためピーク

のシフトが見られる。]

- [28] IR吸収やラマン散乱における 2200cm^{-1} 付近の吸収の帰属を、混同している論文があるので注意を要する。
- [29] J. Shelby et al., J. Am. Ceram. Soc., 65, C59, 60 (1982).
- [30] J. Shelby, J. Appl. Phys., 50, 3702 (1979).
- [31] J. Stone et al., Opt. Lett., 7, 6 (1982).
- [32] J. Shackelford et al., J. Appl. Phys., 43, 1619 (1972).