

■ シリーズ特集 ■

明日を支える資源 (70)

人工石英の現状と将来

—人工水晶とシリカガラスの製法と応用—

Manufacturing Processes and Applications of Synthetic Quartz and Silica Glasses

細野 秀雄*・永井 邦彦**

Hideo Hosono Kunihiro Nagai

1. はじめに

化学式 SiO_2 で表される固体のうち材料として重要なものは水晶とシリカガラスである。本稿では工業材料としての視点から人工水晶とシリカガラスの製法と応用について紹介する。

エレクトロニクス産業を支える電子デバイスの中で、特性の安定した結晶としての人工水晶は欠かせぬ材料として益々重要である。近年、携帯電話に代表される移動体通信の発展は既に目覚ましいものがあるが、次世代携帯電話の通信方式における覇権争いがニュース面を賑わしているように、将来においてもデジタル化と更なる多機能化が進み、世界レベルでの更なる普及が期待される。人工水晶デバイスにおいても高精度化・小型化・軽量化はその一翼を担っていると言える。移動体通信用デバイスに使用される圧電材料として、リチウムタンタレート(LN, LiTaO_3)・リチウムナイオベート(LN, LiNbO_3)・四ほう酸リチウム(LBO, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$)などと比べ、人工水晶は特に優れた周波数温度特性が要求される領域のデバイスで、独占的に使用されている。この理由から、人工水晶は日本での工業化が昭和38年に開始以来、35年を経た今も生産量の増大を続けているが、資源としての人工水晶生産マップは大きな変貌の時期にきていると言える。

一方、シリカガラスは別名「石英ガラス」とも呼ばれ、酸化物のガラスの中で熱的、化学的性質などが際立って優れているため「ガラスの王様」といわれている。現在では石英を原料とし、これを溶融して製造する方法以外にも後出のように多くのプロセスがあるので上記の名前はほとんど意味を持たないが慣用として現在でも使われている。合成シリカガラスは現在、我々

が容易に入手できる固体材料の中で最も高純度な固体物質(水晶よりもはるかに純度が高い)である。これは20年ほど前に光通信用ファイバーの素材としての強いニーズから気相法による製造プロセスが確立していることによる。また、 $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ などを用い加水分解から液相で合成するゾルゲル法は1980年代の熱心な研究により現在ではシリカのコーティングプロセスとして定着している。

2. 水晶デバイス産業

人工水晶は大きく分けて、①圧電的性質を利用した水晶振動子、発振器、フィルタ、SAW(弾性表面波)デバイスなどと、②光学的性質(旋光性・複屈折性)を利用したOLPF(Optical Low Pass Filter)や波長板、プリズムに代表される。振動子・発振器・フィルタ等の国内生産量の統計は日本水晶デバイス工業会によってまとめられており¹⁾、最近の機種別生産数を表1に示す。現在では月産3億個以上、金額では年間1,900億円以上の市場に発展し、輸出比率は概ね50%となっている。更に、水晶デバイスは表1に加え、SAWデバイスや光学デバイスがそれぞれ概ね月産20億円であるので、水晶デバイスの国内生産総額は2,500億円以上の市場と考えられている。世界的に拡大するエレクトロニクス産業を支える「塩」として、水晶デバイスはハイテク部品の、特異の地位を築いていると言える。

この数年間の産業用振動子と発振器の増加比率は大きく、これが移動体通信による拡大を示す結果となっている。1998年においても民生用途の一般電子機器向けデバイス需要は横ばいの予測だが、移動体通信についてはデジタル化の拡大やISDN網やネットワークの機能展開、MO・MD・DVDなどの光ディスク機器についても特に期待できる分野であり、依然数量の拡大が期待されている。

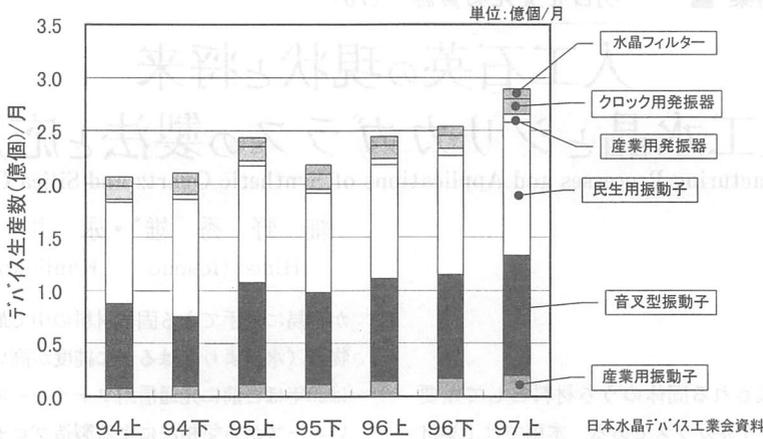
* 東京工業大学応用セラミックス研究所助教授

〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259

** 東洋通信機網水晶技術本部技師長

〒253-0192 神奈川県高座郡寒川町小谷2-1-1

表1 日本の水晶デバイスの生産数量



3. 人工水晶の育成

人工水晶の歴史、その育成法の詳細は参考資料^{2), 3)}に譲るが、簡単にその育成条件の概要を表2に示す。人工水晶はアルカリ溶液中への水晶の高温・高圧下で温度に対する溶解度の差を利用した「水熱温度差法」が利用されている。育成条件の詳細は目的とする人工水晶の用途や、使用するオートクレーブ(高温高圧容器)の大きさなどで決まる。人工水晶の品質はJIS⁴⁾やIEC国際規格⁵⁾に取り決められているが、それらを用途面から育成条件を見てみると、以下のようになる。

1) 民生用振動子・発振器用

Q値としては100万~180万で良く、コスト面の要請が強いため、他の人工水晶に比べ育成速度が速い。種子はY軸方向に長いY棒人工水晶が使用される場合が多く、結晶欠陥密度も1,000本/cm²以上でも使用される。

表2 人工水晶の育成条件代表値

項目	条件
溶液	NaOH and/or Na ₂ CO ₃
添加剤	Li塩(Li ₂ CO ₃ , LiOH, LiNO ₃)
温度(結晶育成槽)	300~350°C
温度差	30~50°C
圧力	900~1500°C
育成速度	0.2~0.8mm/day(Z軸方向)
育成日数	30~150日
種子	Z板200mm(Y), 50mm(X), 0.2mm(Z)
原料	ブラジル産 ラスカ
生産量	2,000kg(650Φ×14mオートクレーブ)

2) 高周波振動子・高安定発振器用

多くは移動体通信用の産業用水晶デバイスとして、10MHz以上の円形又は短冊状薄板に加工され、その切断加工精度は±15を要求されるものも多い。人工水晶のQ値は240万以上が要求され、加工歩留まりに影響する欠陥密度や均質性も重要である。特に高安定用発振器用は移動体通信の各種基地局・計測機器などに用いられるのでQ値は300万以上、欠陥密度も30本/cm²以下の品質が要求される。

3) フォトリソグラフィ、エッチング加工振動子用

水晶振動子の加工は従来、両面ラッピング(遊離砥粒研磨加工)が主流であったが、機械加工による薄板化加工限界は30~40μmであった。しかし更なる高周波化と小型化の要求からフォトリソグラフィ技術とエッチング加工による輪郭形状加工と厚み加工が採用される場合が多くなった。人工水晶の線状欠陥の一部は化学エッチングによって選択的にチャンネル(空孔)を形成しデバイスとして使用できない。これはエッチチャンネル密度として規定されているが、通常このための人工水晶は10本/cm²以下の密度が要求されるため、育成に使用する種子結晶の欠陥密度もこれ以下でなければならない。

4) SAWデバイス用

SAWデバイス用として水晶以外に、リチウムタンタレート・リチウムナイオベート・四ほう酸リチウムなどの圧電単結晶材料は、デバイスの周波数、バンド幅や周波数温度特性によって総合的に評価され、使い分けられる。人工水晶は水熱温度差法で育成され、他の圧電結晶が多くCZ法(回転引上げ法)による育成と異なり、結晶の大型化に伴う難易度・コスト増が大

きい。現在はいずれの結晶も3インチウェーハが主流で使用されているが、今年を契機に4インチウェーハへの移行が進むと予測されている。これによれば育成期間も4ヶ月を超える場合もあり、オートクレーブの生産効率の低下、品質の安定性・種子欠陥の密度低減などに留意する必要がある。

5) 光学デバイス用

光デバイス用人工水晶は特に光の散乱の原因となるインクルージョンの低密度化がポイントとなる。この育成のため、溶液中の対流に乗って浮遊する粒子が、結晶中に取り込まれない工夫が各社で検討されている。結晶育成を完了し、650Φオートクレーブからの人工水晶の取出しの様子を図-1に示す。

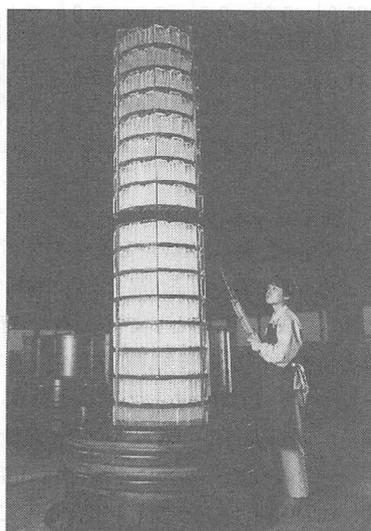


図-1 650Φオートクレーブからの人工水晶生産

4. 人工水晶の生産

現在、世界の生産量を表3に示す。Y棒換算の生産能力と実生産量が大きく異なるのは、①Y棒は生産効

率が高く、オートクレーブの保有容積と良く一致するが、それ以外の人工水晶は品種によって大きく違いがあり、SAW用ではY棒生産の50%以下の効率しか得られない。日本ではそれらの比率が増加している。②ロシアでは未稼働オートクレーブの存在が推測される。③中国ではメガネ用人工水晶の存在や詳細な生産状況が不明などの理由による。

最近ではデバイス生産量の増大と利用分野の拡大によって、国内生産でY棒人工水晶の減少と、人工水晶の大型化と多様化が目立っている。これは産業用人工水晶の高品質化要請とSAW用などの需要増による。同時に中国や東南アジアへの民生用水晶デバイスの生産シフトとコスト削減・ローカルコンテンツへの要請から、コスト的に有利な外国産人工水晶の使用と、国内においては輸入Y棒人工水晶の使用が目立っている。デバイスとしての日本の生産比率は概ね世界の70%程度と考えれば、原石消費もそれに比例して使用されていると思われ、加えて中国・ロシア製のY棒人工水晶は日本資本の中国・東南アジア企業での消費が多くを占める。

SAW用などの大型原石はZ軸方向の育成寸法に比例した育成日数を必要とするのと、オートクレーブ単位容積当たりの生産量がオートクレーブサイズに大きく影響されることにより、日本やロシアの大型オートクレーブ保有国に依存することになっている。ロシアで生産されたSAW用人工水晶は日本・アメリカに輸出され、ウェーハに加工される。

一方、実生産の内訳の合計と実生産量が一致しないのは、種子水晶用原石育成に実生産量の7~10%を必要とするためである。

人工水晶の育成オートクレーブは全て抵抗ヒータ加熱方式によっている。これは温度制御性や安定性に優れていることによるが、同時に長期の育成期間中の電力安定性が必須である。国内で生産の中心となってい

表3 世界の人工水晶生産能力とマップ 単位：トン/年

生産国	生産能力 (Y棒換算)	実生産量	実生産の内訳					
			Y棒	Z板	SAW	光学	時計	石英
日本	1,600	845	200	250	200	90	50	0
アメリカ	580	340	75	180	55	0	0	0
ロシア	2,250	810	200	250	120	30	20	120
中国	1,050	510	480	0	0	0	0	0
ブラジル	20	20	19	0	0	0	0	0
その他	120	105	20	80	0	0	0	0
合計	5,620	2,630	994	760	375	120	70	120

る650mmΦ14m深さのオートクレーブの電力消費は80~120kW/基であり、例えばSAW原石は150日間の育成で1.5トンの生産が完了すれば約250kWh/kgの電力を要する。電力効率の低い650Φ以下のオートクレーブを使用すれば更に電力を消費することになる。このため電力の占めるコストの比率は30%以上となる。ちなみに、残りの30%が種子と原料費、30%が間接材料費や人件費などの経費となる。今後は電力費の安価な地域への生産シフト、省電力育成技術などが重要課題となる。

5. 人工水晶原料（ラスカ）

人工水晶の原料として使用される水晶はラスカ(Lasca)と呼ばれ、ポルトガル語で「破碎されたもの、かけら、破片」を意味する言葉であるが、世界でこの用語が共通的に使用されている。現在、日本で使用されるラスカは大方、ブラジルからの輸入に依存しているが、その他マダガスカル・アフリカ・アメリカ等からのラスカも少量使用されている。ラスカは現地で目視と経験によって、ハンマーによる分割と選別が主に透明度とサイズによって行われる。最先端の国内ハイテク産業も人力の手先によって下支えされ、100%輸入に依存しているのが象徴的でもある。

ラスカの産出状況はペグマタイト鉱床と熱水鉱床から産するが、両者が隣り合って存在する場合やその規模形態は単純ではない⁹⁾。一般的に育成用原料としてはペグマタイト鉱床の方が不純物が安定で含有量も少ない。熱水鉱床のラスカは透明部分を含む場合が多いが、不透明部分を伴うためと不純物の傾向もペグマタイト鉱床とは異なる。このようにラスカの不純物含有量やその傾向は産出鉱脈で多くは決まる。代表的なラスカの不純物含有量を表4に示す。

A~Fは異なるロットとして搬入されたラスカの分析結果を示しており、-1~5はサンプリングごとの分析結果である。分析結果はラスカの不純物に大きな差が存在することを示し、サンプルC、Dはラスカ中にアルカリ塩を主成分とする液体インクルージョンの含有を推測させる。A1は育成結晶のQ値や結晶形態に影響を与えることで、30ppm以下が要求されるが規格を満足していない試料が散見される。またCaは育成溶液中にCa-Silicateの繊維状物質を生成するため、これがインクルージョンの原因ともなり制限する必要がある。分析結果は同時に鉱脈の生成条件による不純物量の差の存在と鉱脈の選定が重要であること

表4 ラスカ不純物分析 (単位: ppm)

試料	Al	Fe	Na	K	Li	Ca	Ti
A-1	24.0	0.2	17.0	2.6	2.8	15.0	0.5
A-2	24.0	1.3	57.0	11.0	1.9	23.0	1.1
A-3	37.0	3.5	44.0	9.7	3.6	42.0	0.7
B-1	14.0	1.4	30.0	5.0	0.6	11.0	0.7
B-2	26.0	1.5	44.0	7.4	1.5	13.0	1.1
B-3	9.5	5.4	140.0	32.0	0.6	86.0	0.4
C-1	29.0	11.0	170.0	39.0	1.0	60.0	1.4
C-2	12.0	1.9	160.0	31.0	0.8	200.0	0.2
C-3	61.0	7.1	140.0	34.0	4.1	71.0	1.0
D-1	59.0	8.7	150.0	38.0	5.2	92.0	0.8
D-2	85.0	<0.1	79.0	13.0	5.3	13.0	0.7
D-3	57.0	6.9	110.0	24.0	3.7	37.0	0.9
E-1	14.0	0.2	0.3	0.6	1.0	1.7	0.2
E-2	26.0	0.2	1.1	2.4	2.4	1.9	0.7
E-3	16.0	0.1	1.0	1.0	1.6	1.9	0.7
E-4	25.0	0.2	2.5	1.9	3.0	7.1	0.4
E-5	15.0	0.2	0.7	0.8	1.2	2.5	0.1
F-1	17.0	0.3	3.4	0.6	2.0	1.3	0.3
F-2	26.0	0.3	4.6	1.0	3.9	1.8	0.4
F-3	20.0	0.3	2.9	1.0	2.5	1.7	0.2

を示している。

高品質人工水晶、特にSAW用とエッチング加工用原石にとって、低欠陥の種子水晶は必須の材料である。種子の欠陥は育成域の欠陥として引継がれ、育成回数を経るほど増加する⁷⁾。従って、低欠陥種子の確保は育成メーカーにとって重大テーマとなっている。人工水晶の種子は元を辿れば、天然大型結晶に帰着するが、最近のブラジルの鉱脈からの大型天然原石の産出は期待できず、枯渇傾向にあると言われる。かつて、ブラジルのMinas Gerais, Bahia州では大型天然原石が多く産出したが、これの多くはアメリカが貴重な戦略物資として収集された歴史がある。今後、日本の人工水晶メーカーは育成技術の開発によって結晶中の欠陥の低減、種子サイズの長尺化を図るための研究をおこない人工水晶の高品質化に対応する必要がある。

6. シリカガラスの製法と特徴

表5にはシリカガラスの製法、特徴と応用例をまとめる。最近の成書としては文献^{8)~10)}が挙げられる。

シリカガラスの製法としては、大別すると石英を原料とし、これを熔融する方法と原料モノマーから重合により合成する方法がある。前者で作られたものは熔融石英ガラス、後者のものは合成シリカガラスと称される。熔融石英ガラスは合成シリカガラスよりも一般に耐熱性(軟化する温度が高い)は高いが、原料の石

表5 シリカガラスの製造方法、特徴と用途

製造方法	特徴	用途
[合成シリカガラス] ・直接法(火災溶融法) ・VAD(気相軸付け法) MCVD法 ・プラズマ法 ・ゾルゲル法	原料は四塩化珪素や四エトキシシランなどを使用 有水, 高純度, 均質, 無気泡 無水, 高純度, 均質, 無気泡 無水, 高純度, 均質, 無気泡 有水, 高純度, バルグは作製が困難だが, 薄膜は容易	ランプ用(UV用), 光学用レンズなど, 半導体用フォトマスク 光通信用ファイバー 光通信用ファイバー コーティング膜, ICのフィラー
[合成石英ガラス] ・ベルヌイ法 (火災溶融法) ・真空溶融法 ・アーク溶融法 ・抵抗溶融法	原料は天然石英を使用 有水, 無気泡 無水, 耐熱性 無水, 表面は未溶解層があり 外見は不透明乳白色 無水, 表面に未溶解層があり 外見は不透明乳白色	ランプ用(キセノン), 光学用(レンズなど), 半導体工業(フォトマスクを除く) ランプ用(メタルハライド用), 半導体工業 半導体工業(ベルジャー, るつぼなどの容器) 半導体工業(主に拡散炉プロセス管)
[特殊透明石英ガラス] ・火災溶融法 TiO ₂ 含有 CeO ₂ 含有 ・真空溶融法 TiO ₂ 含有 V ₂ O ₅ 含有	原料は天然石英などを使用 有水, 無気泡, オゾン発生なし 有水, 外線を完全に吸収 無水, 耐熱性 無水, 黒色	ランプ用(主にキセノンランプ, コピー機など) ランプ用(主に核融合用フラッシュランプ) ランプ用(主にコピー機用) 光学用など特殊用途
[不透明石英ガラス] ・アーク溶融法 ・抵抗溶融法	原料は天然ケイ砂などを使用 外観は乳白色不透明 大型製品の製造が不可能 外観は乳白色不透明体	各種化学工業用, 半導体工業用, 光学用(主にるつぼ溶解用) 各種化学工業用, 半導体工業用, 光学用, 加熱用ヒーター外管, 電気絶縁用管など

英に含まれる不純物(アルミニウム, ナトリウムなど)がそのまま残存するので, 光ファイバーやフォトマスクなど高い透明性と照射耐性が要求される用途には適さない。酸水素炎で溶融するベルヌイ法では炎中に水が生成するのでガラス中にOH基がかなりの量残存する。真空溶融法などでOH基の量を低減すると耐熱性はさらに改善される。合成シリカガラスはSiCl₄などの蒸気圧の高い原料を酸水素炎で加水分解, あるいは酸素プラズマで酸化する方法で作られる。原料が蒸留で精製できるので高純度なガラスが得られる。現在, 無水の製品はSiCl₄を酸水素炎で加水分解して得られるガラス微粒子を塩素処理しSi-OHをSi-Clに変換後, 不活性ガスの雰囲気下で焼結と脱塩素化をおこなって製造される割合が高くなっている。

また, 紫外線ランプからオゾンの発生を抑制するためにTi⁴⁺をドーピングした特殊なガラスも製造されている。

7. 合成シリカガラスの最近の応用

合成シリカガラスの真空紫外領域から赤外領域までの光吸収特性を図-2に示す。赤外域の透過限界はSi-O結合の振動による吸収で, 紫外域の限界は電子遷移で決まる。光通信帯の波長域にはレーリー散乱による損失の理論曲線と赤外域の多フォノン吸収の裾が交差する1.3-1.5 μ mが使用されている。この領域の透過損失は残存するSi-OH基に起因する多フォノン吸収が支配するので, 光ファイバー用の合成シリカガラスはOH基の濃度を極限まで低減したものである。SiOHを塩素化しOH基の濃度をppb以下のレベルまで減らすことでこの波長域の伝送ロスが理論値にまで達している。

最近, 半導体のより一層の高集積化を目指した微細加工は水銀灯の輝線からエキシマーレーザーを光源とする新しいフェーズに入りつつある。一昨年よりKrF(発振波長: 248nm)レーザーを用いたリソグラフィが実用化され, 研究はより短波長の紫外光を発振する

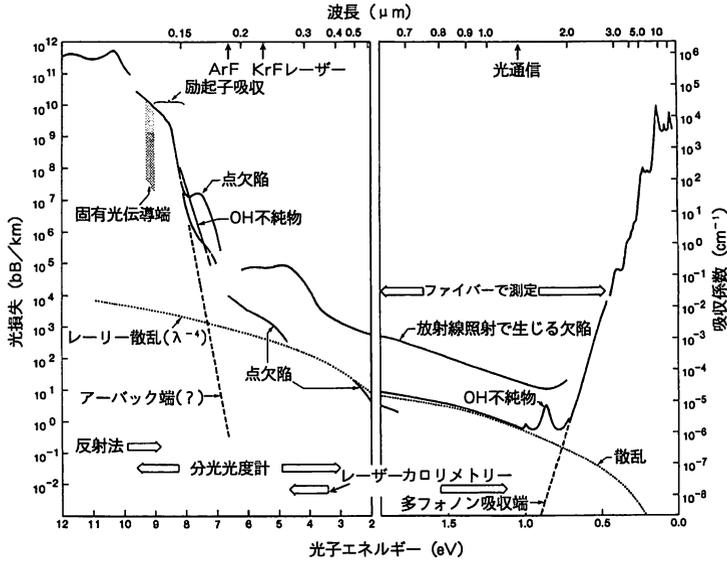


図-2 高純度合成シリカガラス (含水) の光学吸収特性

ArFレーザー (193nm) を用いた開発がメインになっている。このような強力で短波長の紫外線を発振するパルスレーザーに対する光学材料の素材と耐えられるガラスは合成シリカガラスしか考えられない。この用途では精密な回路パターンを微小な領域に原図に忠実に投影するために、レーザーの波面の乱れを極力小さくする必要がある。このため、屈折率変動を 10^{-6} オーダーで抑え、かつレーザー照射による光透過率変化や蛍光の発生を抑制しなければならない。エキシマーレーザーによる光特性の変化はガラス中に存在する構造の不完全性 (構造欠陥) により強く影響される⁸⁾。構造欠陥は試料の製造プロセスに依存し、光通信用の試料のように脱OH処理をおこなったものはその濃度が高い。また、SiOHを含有するガラスは高温での粘性が無水ガラスに比べ低下するので試料の均質化処理がおこないやすい。よって、この目的には光通信には不適であった直接法で作製された合成シリカガラスが専ら用いられている。

エキシマーレーザーによる合成シリカガラスの損傷で現在もっとも重要な問題は照射により誘起される屈折率の増大 (密度の増大に起因する) である。シリカガラスは粒子線やレーザービームの照射を受けると高密度化が生じ、その程度は飽和値で約2%である。最近の研究⁹⁾によると図-3のように屈折率変化は照射するレーザーのパルス当たりのパワー密度の2乗にほぼ比例することが報告されている。シリカガラスのバンドギャップは約9eVなどでArF (6.3eV), KrF (5

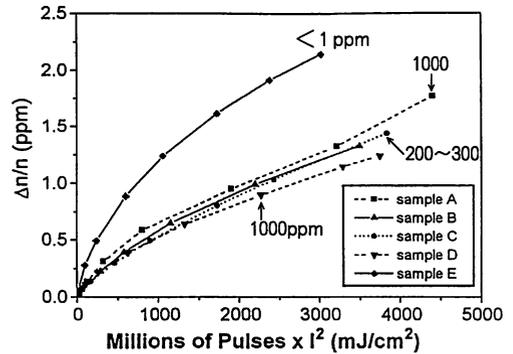


図-3 いろいろな高純度合成シリカガラスのArFエキシマーレーザー照射による屈折率変化。サンプルA~Eは均質度またはOH不純物濃度が異なる。Iはレーザーのパワー密度

eV) レーザーいずれの場合でも1光子のエネルギーではバンド間遷移を起こすことはできないが、2光子のそれでは十分な大きさである。よって、2光子吸収過程を経て生じたバンド間遷移を経て生じた構造変化がその原因であろう。この構造変化はバンド間励起で生じるので、もはや製造履歴に起因する構造欠陥がよるものは主ではなく、ガラス構造そのものが変化をしていると考えられる。最近、シリカガラスを電子励起すると酸素の空孔と格子間イオンの対 (フレンケル欠陥) が生成するということが初めて明らかになった¹⁰⁾。電子系を励起することで生じるガラス構造を形成する酸素の移動がこのような体積変化と関係しているものと想像される。屈折率変化が1光子ではなく2光子吸

収過程で生じることは、応用上は極めて重要である。すなわち、同じ光子数を照射する場合にその密度を1/10にすれば損傷は1/100に低減できる。よって、実際のリソグラフィーには400Hzという高繰り返しで数mJ/cm²の低パワーのレーザー光を用いることでレンズ系の損傷を押さえている。

8. おわりに

5年ほど前には、日本の人工水晶生産は他国を引き離し、トップの座にあった。今後、ロシアの稼働効率向上と中国の設備投資が実施されれば、量的な世界の生産マップは大きく変わる。このとき、日本の生産する人工水晶はより付加価値が高く、コスト対応力のある高品質人工水晶生産に特化、シフトする必要性を生じる。このためには世界に先駆けた育成技術力の向上が必須と考えられる。

合成シリカガラスは原料であるSiCl₄が半導体用シリコンの製造過程で副生するので、シリコン半導体の製造量の増加にともない大量に製造されるようになった。合成シリカガラスでも通信用とリソグラフィー用では適した含OH濃度が異なるし、熔融石英ガラスの軟化温度はOH基の濃度が同じ合成シリカガラスよりも明らかに高い。用途に応じた使い分けが重要である。

参考文献

- 1) 水晶デバイス-統計, 日本水晶デバイス工業組合, Vol.19, No.4 (1998) 他
- 2) 永井邦彦, 水熱化学ハンドブック, 技報堂, pp. 251-268 (1997)
- 3) 永井邦彦, 高純度シリカの応用技術, シーエムシー, pp. 51-66 (1991)
- 4) 人工水晶, JIS C 6704 (1997)
- 5) Synthetic Quartz Crystal-Specification and Guide to the Use, IEC 758 (1993)
- 6) 岩崎秀夫, 岩崎文子, ニューセラミックス, Vol. 7, No. 12, pp. 57-62 (1994)
- 7) K. Nagai et al., A parametric study of line defects in synthetic quartz crystal, IEEE International Symposium of Frequency Control, (1997)
- 8) I. Fanderlik; Silica and Its Application, (1991) Elsevier.
- 9) R. A. B. Devine (Ed.), The Physics and Technology of Amorphous SiO₂, (1987), Plenum Press.
- 10) D. L. Griscom and H. Hosono (Ed.), The R. A. Weeks International Symposium on Science and Technology of SiO₂ and Related Materials (1994), Elsevier.
- 11) 柴田修一, 微粒子からつくる光ファイバ用ガラス (1997) 内田老鶴圃.
- 12) 特集 見直されるシリカ, ニューセラミックス, 9, vol. 5 (1992).
- 13) 林瑛, 高純度シリカの応用技術 (1991) シーエムシー.
- 14) 葛生伸, 石英ガラスの世界 (1995) 工業調査会.
- 15) 細野秀雄他, セラミックス, 22, 1047 (1987).
- 16) R. Schenker, F. Piao, and W. G. Oldham, SPIE. Proc. Vol. 2726, 298 (1996).
- 17) H. Hosono, H. Kawazoe and N. Matsunami, Phys. Rev. Lett. 80, 317 (1998).

協賛行事ごあんない

「第17回光がかかわる触媒化学シンポジウム」

〔主催〕理化学研究所, 触媒学会

〔協賛〕日本化学会, 高分子学会 他

〔日時〕平成10年6月8日(月)

〔会場〕東京工業大学・百年記念館

(目黒区大岡山2-12-1)

〔参加費〕一般3,000円, 学生1,000円(当日受付)

〔申込先〕〒226-8501 横浜市緑区長津田町4259

東京工業大学生物工学科 大倉一郎

TEL 045-924-5752

FAX 045-924-5778