

平成27年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「光導波モードセンサ用多層膜コートプリズムの開発」

研究開発成果等報告書

平成28年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 株式会社つくば研究支援センター

目次

第1章	研究開発の概要	1
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2	研究体制	4
1-3	成果概要	8
1-4	当該研究開発の連絡窓口	9
第2章	本論	10
2-1	光導波モードセンサ用センサチップ概要	10
2-2	多層膜コート技術の開発	12
2-2-1	概要	12
2-2-2	検出感度を上げるための3層コートモデル	13
2-2-3	反射層の微結晶化	14
2-3	多層膜コートプリズムの性能評価	15
2-3-1	膜物性の評価	15
2-3-2	評価用光導波モードセンサの試作	17
2-3-3	光導波モードセンサによる実証試験	18
2-4	専用製造装置と量産プロセスの開発	19
2-4-1	プリズム固定用ジグ	19
2-4-2	専用PVD装置	19
2-4-3	製造プロセスとコスト	21
第3章	全体総括	23
	今後の予定	25

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

【研究開発の背景】

光導波モードセンサ^{*1}は、感度とモバイル性の高さから、免疫アッセイ(インフルエンザ等の臨床検査)やICP発光分光(飲料水の重金属検出など)に代わる次世代型高感度溶液センサとして注目されている。しかし従来技術では、消耗品であるセンサチップの製造に高度な光導波路を形成するための複雑なプロセスが必要であり、市場ニーズに合った販売単価を実現できなかった。

センサチップの生産性向上によるコストダウンは、光導波モードセンサの事業化における最重要課題である。

コストダウン目標として、センサチップの販売単価で¥2,000を切ることが川下製造業者や最終顧客のニーズとして上がっており^{*2}、本研究開発では、これまで性能重視で進めてきたセンサチップ製造技術開発の方向性を、コスト重視へと大きくシフトする。

言い換えると、従来技術で製作したセンサチップは性能(検出感度)を追求しすぎたため、コスト的に市場ニーズから乖離(ガラパゴス化)してしまった。よって、新技術では、性能・コストのバランスを市場ニーズに整合させる(脱ガラパゴス化)ことが課題となる。

上記を達成するには、製造工程の革新的転換が必要であり、適切なレベルの性能を維持しながらコストを抑制するために、普及した(枯れた)技術の組合せ+ α で新しい技術を開発する方法をとる。具体的には、低融点ガラスのモールド成形(デジタルカメラ用レンズ等で普及)と電子線蒸着やスパッタリングなどの物理蒸着(Physical Vapor Deposition。以下PVD)プロセス(反射防止膜等で普及)を組合せて、プリズム上に多層膜を直接形成する。

本技術開発においては、複雑な形状のプリズムに、高品質な多層膜をコートするPVDプロセスこそがキーテクノロジーである。

*1: 光を局所的に閉じ込めて伝搬させる光の通路を導波路と呼ぶ。導波路内を伝搬する光のモード(伝搬の仕方)を導波モードと呼ぶ。導波路内を伝搬する光の電場は、完全に導波路内にのみ存在するのではなく、いくらか導波路外に染み出している。この染み出している光の電場のことをエバネッセント場と呼ぶ。エバネッセント場内に物質が進入し、そこに誘電率の変化が生じると、導波モードに変化が生じる。この変化を捉えて、物質の存在を検出するセンサが光導波モードセンサである。

* 2: オプテックス(株)の独自マーケティングおよび SBIR 技術革新事業で実施した市場調査の結果

②研究開発の背景(これまでの取組など)

光導波モードセンサの光学系模式図を図1に示す。

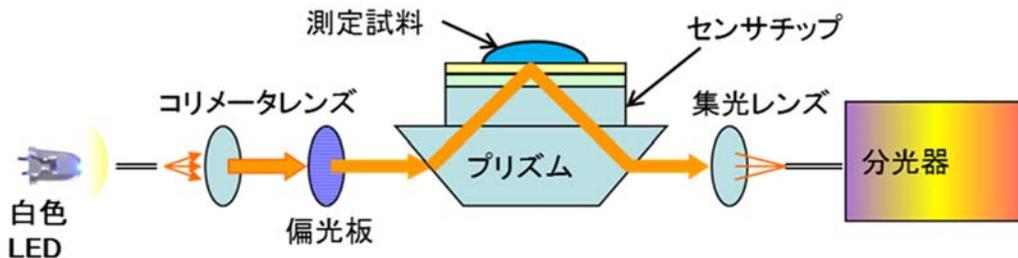


図 1 光導波モードセンサの光学系模式図

この中で、センサチップ部分は、測定試料と接触することから、消耗品扱いとなる部材である。

また、プリズムとセンサチップは光学的に結合する必要があることから、実用上プリズムも一体型として消耗品としなければならない。

センサチップ部分の基本的な膜構造を図2に示す。

従来の性能重視型のアプローチでは、層の界面はできるだけフラットで、各層の組成も緻密な結晶構造を追求したため、コスト高であった。



図 2 センサチップの基本構造

このアプローチでは、材料として SOQ (Silicon On Quartz) ウエハを選択し、SOQ の Si 膜を熱酸化して高品位な光導波路層を形成する技術^{*3}が産総研で開発された。

SOQ ウエハは SOI (Silicon On Insulator) ウエハの一種である。2000年台初頭、SOI が LSI や PC の MPU などに採用されたため、製造技術の進化が急速に進み、同様に Smart Cut もしくは Unibond と呼ばれる技術で製造される SOQ の価格も急速に下がっていくことが期待された。

しかしながら、SOQ は今日まで大口需要を獲得することができず、製造技術を開発したソイテック社(株)をはじめ、多くが商業生産をストップしてしまった。現在、国内で商業生産可能なメーカーは信越化学工業だけであり、調達コストも8インチ SOQ ウエハが約30万円/枚と主要なコスト高要因になっている。

追跡調査の結果、現時点において SOQ の価格低下は望み薄との判断に達し、SOQ を使わないセンサチップ製造技術の開発が課題となっていた。

他方、我々は光導波モードセンサの開発を進める中で、図3に示すように、センサチップ基本構造にプラスして ITO など透明電極薄膜をコートし、薄膜を電極とした電

気化学反応を用いて水中の有害重金属イオンを高感度検出する技術(図3)を開発した*4。

このITO薄膜は、従来技術で作成したセンサチップ上にPVDプロセスを用いて形成している。つまり、新技術の製造工程には容易にアドオンできることから、多層膜コート最終工程に組み込む形で同時に研究開発を行う。

*3:特開 2009-085714「酸化膜を用いた光導波モードセンサ及びその製造法」

*4:2013年 応用物理学会 秋年会「導波モードセンサを利用した水中の微量な鉛イオンの選択的検出」

特開 2012-163342「金属検出装置、検出版および金属検出方法」

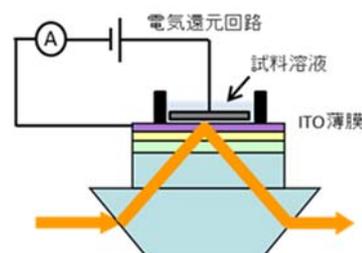


図3 重金属検出用装置

本研究開発で使用する特許について下表にまとめる。

また、下記2件の特許に関し、シーアンドアイと産総研間で実施に関するライセンス契約を締結済みである。

表中にも記載の通り、これらの特許について係争はなく、調査の結果、類似の特許も見つかっていない。

これら以外にも、光導波モードセンサ技術に関連する特許を産総研、シーアンドアイで複数出願しており、強力な知財基盤を備えている。

特許の名称 (最新状況)	出願番号(出願日) (公開、公告、登録のうち 最新のもの)	出願人	発明者	係争の 有無
光導波モードセンサー用のチップ	特許第481135号 (登録日 H22. 9. 10)	国立研究開発法人産 業技術総合研究所	藤巻 真 福田 伸子 玉田 薫	無し
光導波モードセンサー	特許第459072号 (登録日 H22. 10. 1)	国立研究開発法人産 業技術総合研究所	藤巻 真 福田 伸子 玉田 薫 粟津 浩一	無し

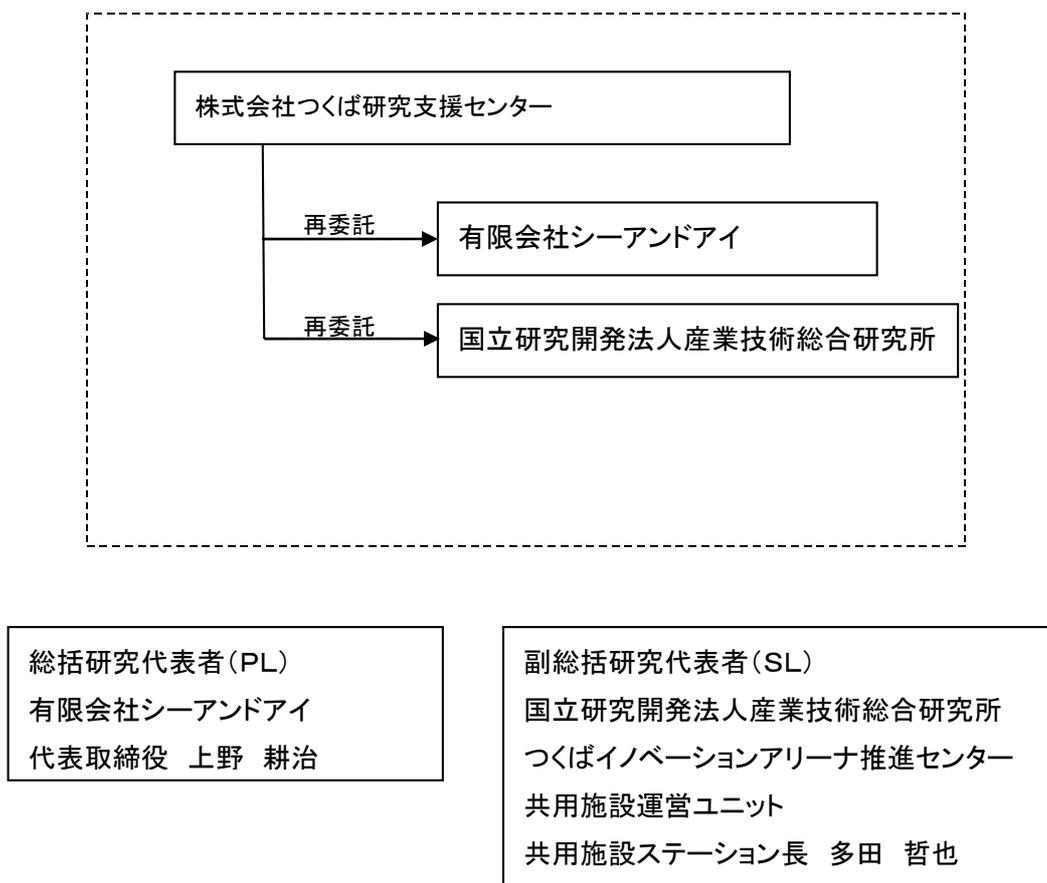
【研究目的及び目標】

本研究開発の目的は、光導波モードセンサ用センサチップの新しい製造技術を確立することである。

従来技術では、センサチップに高度な光導波路を形成するために複雑なプロセスが必要であり、製造コストを市場ニーズに合わせることが難しかった。本研究開発では、PVD プロセスを応用してプリズムに直接多層膜コートを行うことで、センサチップの製造プロセスを大幅に簡略化し、生産性向上とコストダウンを実現し、従来技術と同レベルの性能を3分の1のコスト(¥1,000/個)で達成する。

1-2 研究体制

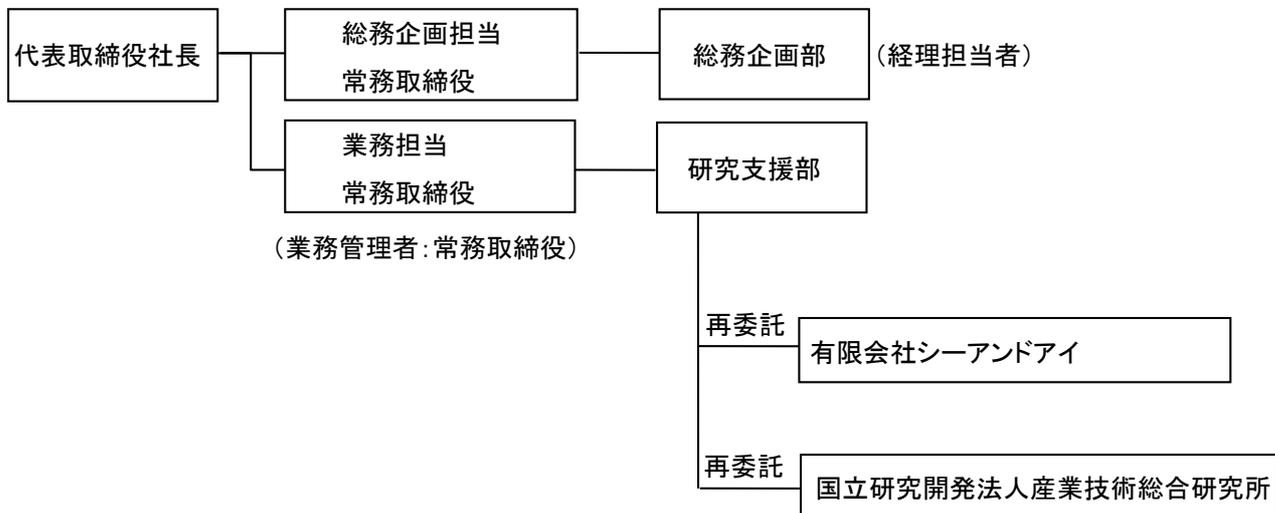
【研究組織(全体)】



【管理体制】

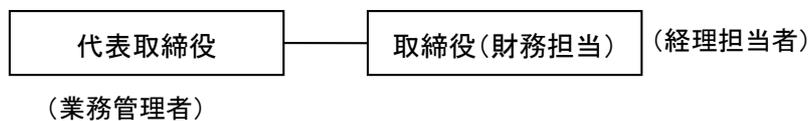
① 事業管理機関

[株式会社つくば研究支援センター]

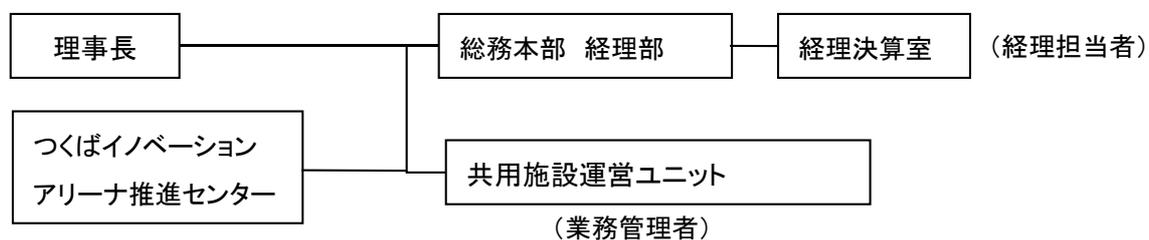


② 再委託先

[有限会社シーアンドアイ]



[国立研究開発法人産業技術総合研究所]



【管理員及び研究員】

＜事業管理機関＞

[株式会社つくば研究支援センター]

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
高田 青史	研究支援部 次長	⑥
湯原 幸子	研究支援部 課長	⑥
五井 博	研究支援部	⑥
山脇 知子	研究支援部	⑥

＜再委託先＞

（研究員）

[有限会社シーアンドアイ]

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
上野 耕治	代表取締役	①②③④⑤

[国立研究開発法人産業技術総合研究所]

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
多田 哲也	つくばイノベーションアリーナ推進センター 共用施設運営ユニット 共用施設ステーション 長	②③
秦 信宏	ナノエレクトロニクス研究部門 研究主幹 (兼)つくばイノベーションアリーナ推進セン ター 共用施設運営ユニット 共用施設ステー ション	②③

【経理担当者及び業務管理者の所属、氏名】

＜事業管理機関＞

[株式会社つくば研究支援センター]

（経理担当者）総務企画部 課長

沼田 きみ江

（業務管理者）常務取締役

三石 安

＜再委託先＞

[有限会社シーアンドアイ]

（経理担当者） 取締役(財務担当)

上野 優子

（業務管理者） 代表取締役

上野 耕治

[国立研究開発法人産業技術総合研究所]

(経理担当者) 総務本部 経理部 経理決算室 室長 新井 清和

(業務管理者) つくばイノベーションアリーナ推進センター 共用施設運営ユニット長
井佐 好雄

【他からの指導・協力者】

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
上野 耕治	有限会社シーアンドアイ 代表取締役	PL
多田 哲也	国立研究開発法人産業技術総合研究所 つくばイノベーションアリーナ推進センター 共用施設運営ユニット 共用施設ステーション長	SL
秦 信宏	国立研究開発法人産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門 研究主幹 (兼)つくばイノベーションアリーナ推進センター 共用施設運営ユニット 共用施設ステーション	
三石 安	株式会社つくば研究支援センター 常務取締役	
高田 青史	株式会社つくば研究支援センター 研究支援部 次長	
湯原 幸子	株式会社つくば研究支援センター 研究支援部 課長	
藤後 達也	オプテックス株式会社 ビジネス開発本部 環境計測部 部長	アドバイザー
土岐 芳昭	株式会社ウォーターエージェンシー セールスエンジニアリンググループ 係長	アドバイザー
嶋 秀明	シスメックス株式会社 研究開発本部 シニアプランナー	アドバイザー
田畑 彰守	国立大学法人名古屋大学 工学部 電気電子情報工学科 准教授	アドバイザー

1-3 成果概要

【研究目標】

PVDプロセスを応用してプリズムに直接多層膜コートを行うことで、センサチップの製造プロセスを大幅に簡略化し、生産性向上とコストダウンを実現し、従来技術と同レベルの性能を3分の1のコストで達成する。

目標数値

- ・性能： 屈折率変化に対する検出感度 \geq 従来品の 70%
- ・コスト： センサチップの製造原価 \leq ¥1,000 / 個

【達成状況】

検出感度、製造コストの両面で目標を上回る成果を得た。

達成数値

- ・性能： 屈折率変化に対する検出感度 = 従来品の 100%
- ・コスト： センサチップの製造原価 = ¥223 / 個

【成果一覧】

研究開発項目	成果
①多層膜コート技術の開発	・反射層の Si、SiGe の微結晶化技術を完成した。 ・3層目に電場増強の役割を担わせる3層コート構造(反射層+導波路層+電場増強層)による高感度化技術を発見、体系化した。
②多層膜コートプリズムの性能評価	・光学薄膜の膜厚、光学特性、結晶性、形状観察、電気特性についてのデータ収集、および評価技術ノウハウを得た。 ・従来技術と新技术をイコール条件で比較可能な評価用光導波モードセンサを試作し、定量的評価を行った。
③専用製造装置の開発	・100 個のプリズムを固定できる専用ジグ、および微結晶化プロセスに対応した構成の専用 PVD 装置を開発した。 ・量産プロセスで試作を行い、歩留り、原料価格、ユーティリティ・メンテナンスコストからバッチあたりの製造コストを確定した。 ・センサチップの性能および品質面で安定した量産プロセスを確立した。
④その他	・①に関して特許出願を行った。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(フリガナ) タカタ セイシ

氏名: 高田 青史

所属組織名: 株式会社つくば研究支援センター

所属役職: 研究支援部次長

Tel: 029-858-6000 Fax: 029-858-6014

E-mail: tcj-is@tsukuba-tci.co.jp

第2章 本論

2-1 光導波モードセンサ用センサチップ概要

センサチップの基本構造を図4に示す。プリズム上に反射層(Si)と導波路層(SiO₂)の2層構造からなり、用途によりノーマルチップとカラーチップと呼んでいる。また、酸化・還元などの電気化学反応を行うための透明電極層(ITO)を追加した3層構造がある。

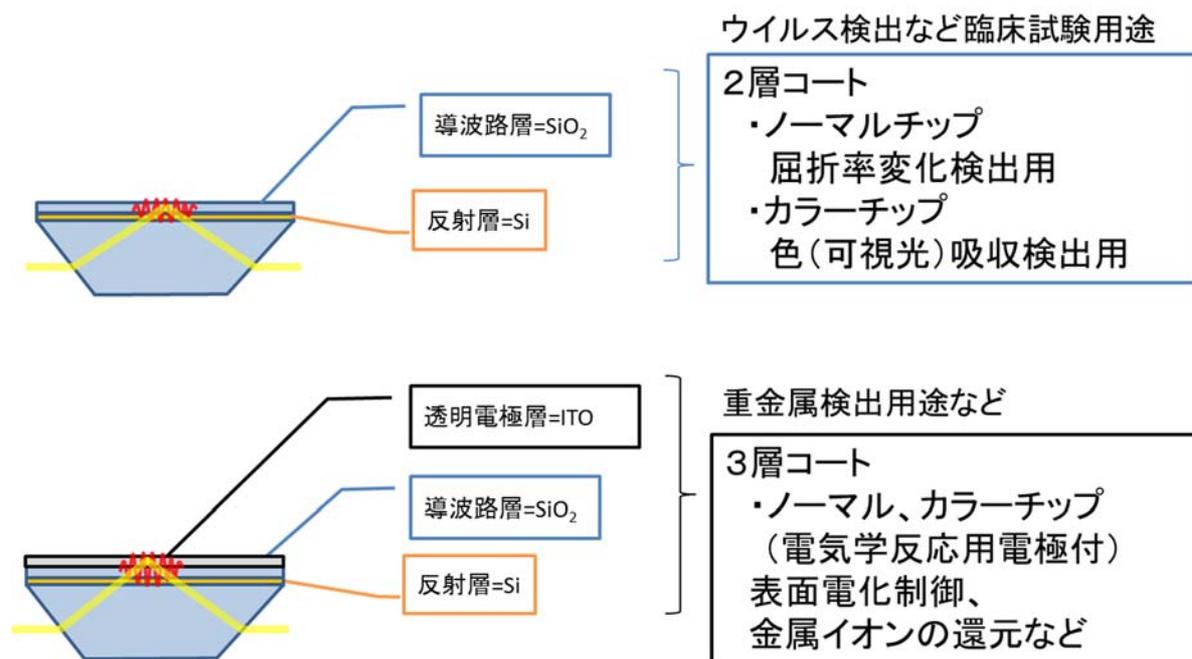


図4 センサチップ基本構造模式図

ノーマルチップやカラーチップを用いて様々なものを測定する場合、具体的には図5に示すように、導波モードが励起することにより特定の波長帯域に出現する反射率ディップの縦(波長)又は横(反射率)方向の変化を検出する。

3層コートカラーチップ(電気化学用電極付)の応用例の一つに、水中の有害重金属の検出がある。このチップは、透明電極層の表面で水中にイオン化して溶解している重金属を還元し、不溶化(メタル化)することにより、極めて微量な溶存重金属イオン(例えば、水道水質検査基準濃度のカドミウム:0.003 ppm)を検出することができる。

その他に、検出感度を上げる目的で3層コートとする場合もあり、その場合、3層目は必ずしも透明電極でなくとも、2層目より屈折率が高く透明であればよい。各層の光学定数及び膜厚を適切に設計することで、2層コートより光電場強度を増強(=検出感度を大きく)することができる。

3層コート化による高感度化は、半導体プロセスを用いた従来技術では、費用対効果の面から現実的でなかった。しかしながら、PVDプロセスによる成膜では、特段のコストアップ要因と

ならず、導波路層の膜厚を薄くできることで全体のプロセス時間短縮につながるなど、非常に有効であることがわかった。

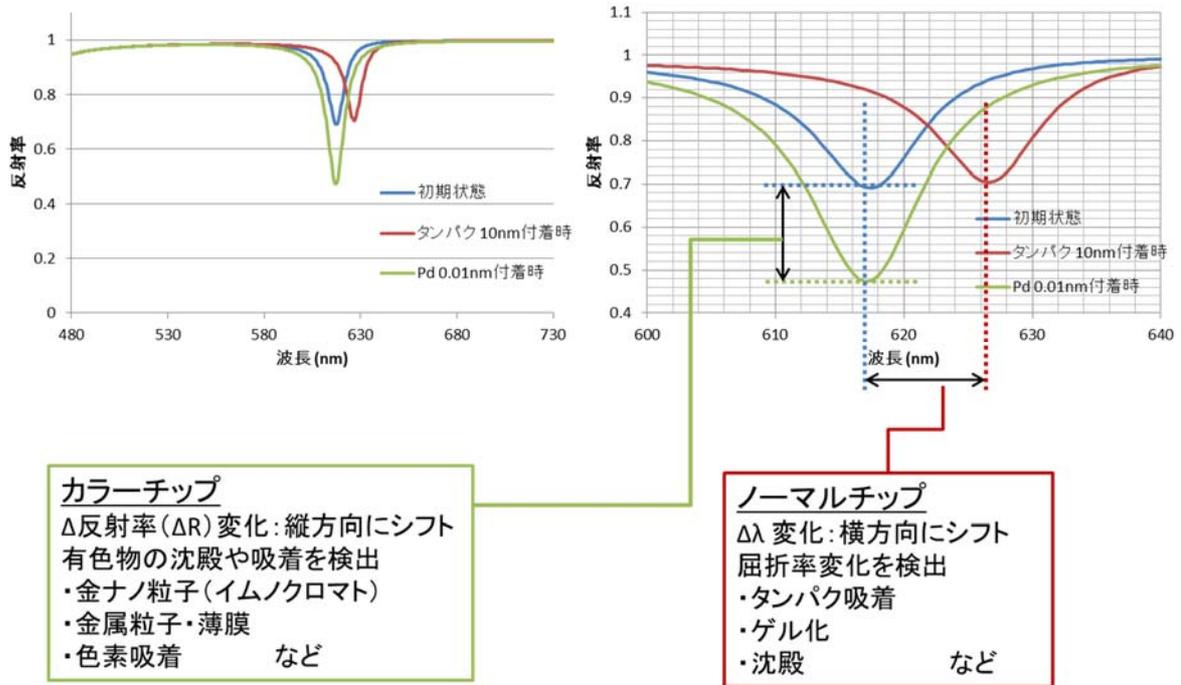


図 5 光導波モードセンサの検出原理

2-2 多層膜コート技術の開発

2-2-1 概要

研究開発全体におけるシミュレーションの位置づけは極めて重要であり、図6に示すように単層の成膜技術開発(実験)と相補的なループを形成することで、論理的に多層膜の最適構造及び成膜条件を短い検討期間で導き出す原動力となった。

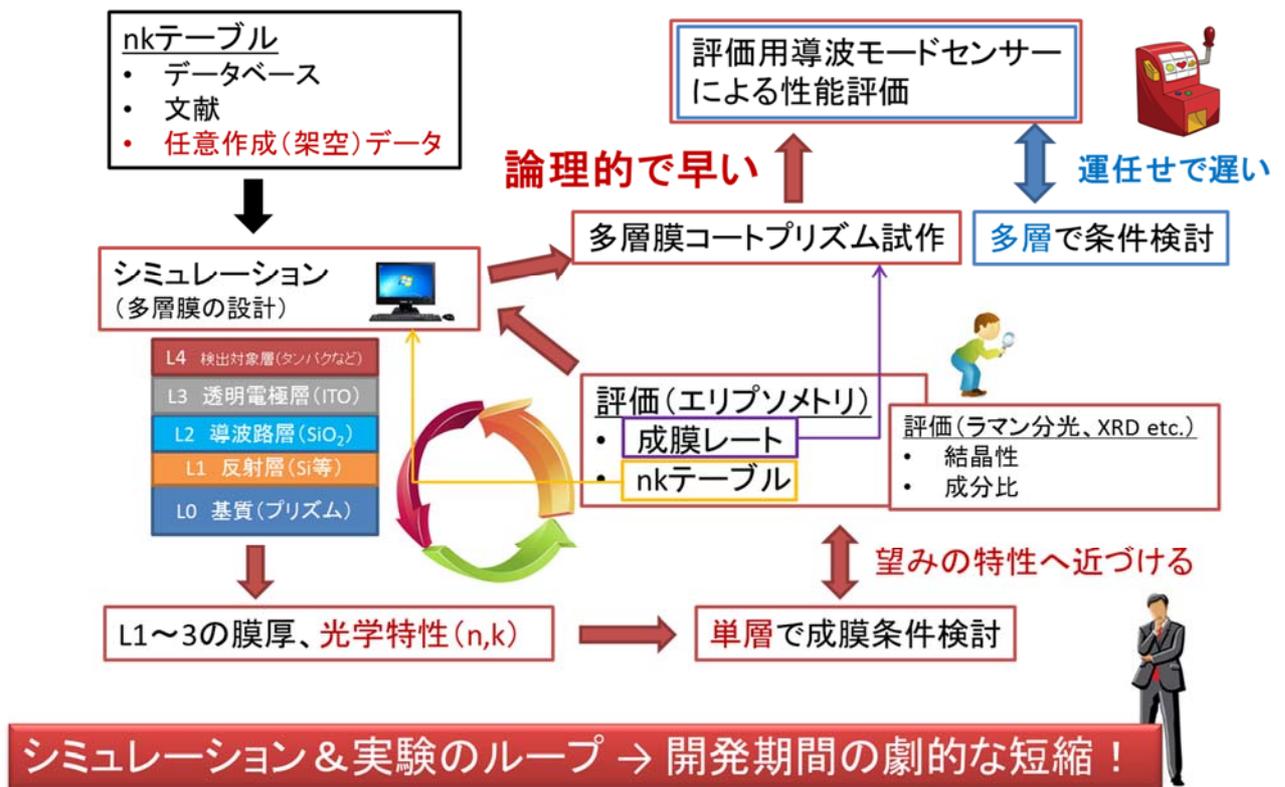


図 6 開発フロー

2-2-2 検出感度を上げるための3層コートモデル

まず、1層目(反射層)の光学特性は、単結晶シリコンなど(High n、low k)が適している。

次に2層目は、透明なガラス系材料(low n、low k)が適している。

これに加え、3層目に透明で、屈折率が2層目(導波路層)より大きい膜を追加すると、3層目はセンサ表面の電場強度を強くする(=センサ感度を上げる)電場増強層として機能することを発見した。

端的な例を図7に示す。図7は、第1~3層目まで全て、試作品をエリプソメトリで実測した光学定数を元にシミュレーションしたものである。検出感度は従来品の125%であり、シミュレーション上の目標値(従来品の80%以上)を大幅に上回ることに成功した。

3層コート_ノーマルチップ

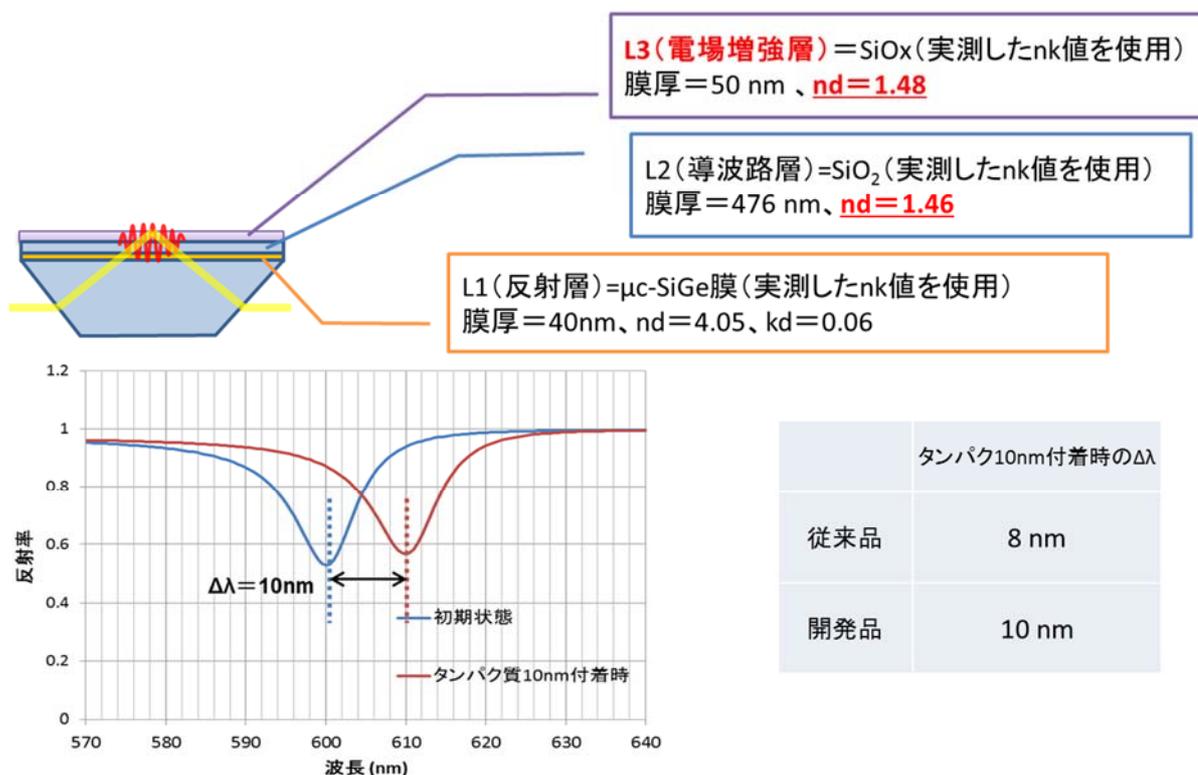


図7 電場増強層により高感度化した3層コートモデル

2-2-3 反射層の微結晶化

反射層に適した光学特性 (High n, low k) の達成には、通常の PVD プロセスで成膜可能なアモルファル膜ではなく、微結晶化させる技術が鍵となる。

反射層の微結晶化は、先行研究を参考に検討を行い、温度、反応ガス組成、プロセス圧条件を最適化することで達成した。

Si は水素化することで収集波長が短波長側にシフトし、さらに微結晶化すると徐々に単結晶の光学特性に近づいていく。

微結晶化や合金化により、光学定数 (nk テーブル) を単結晶シリコン (c-Si) に近づくように検討を行った結果、図8に示すように、 $\mu\text{-SiGe}$ で c-Si に近い光学特性を得ることに成功した。

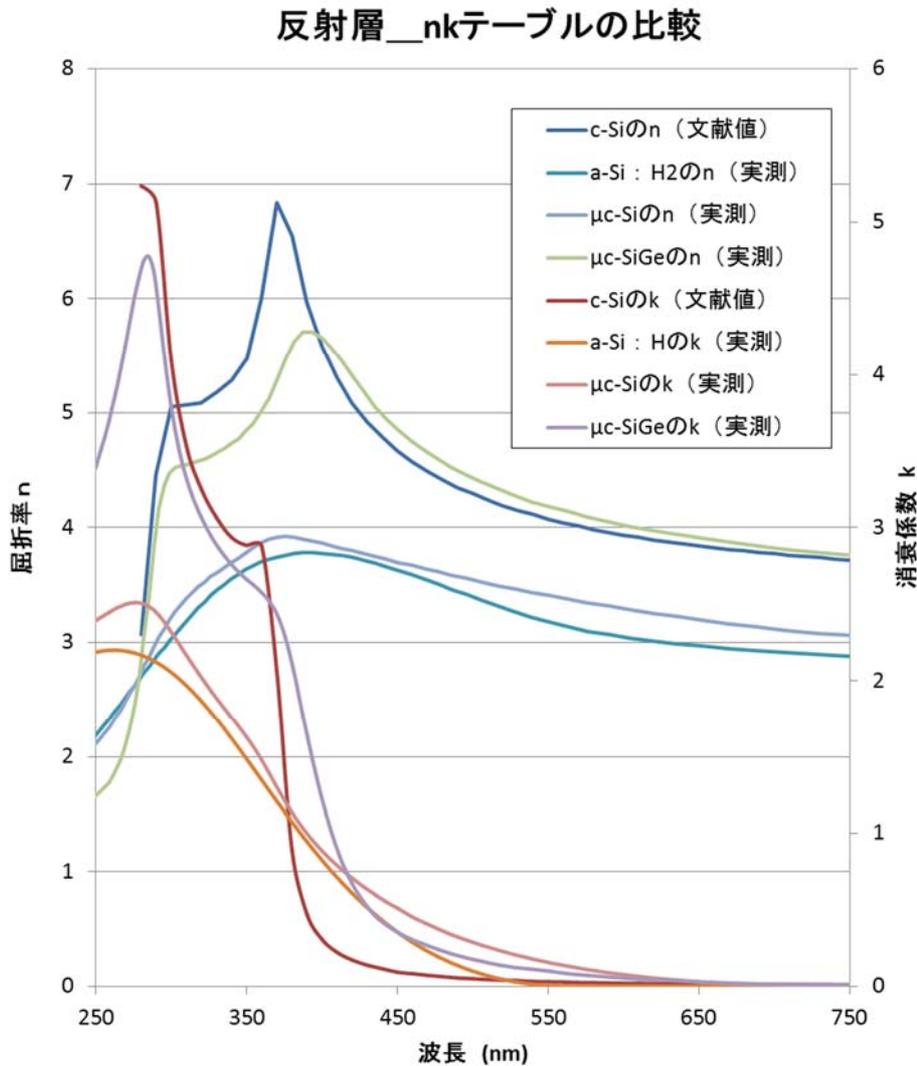


図 8 反射層の光学特性

2-3 多層膜コートプリズムの性能評価

2-3-1 膜物性の評価

ラマン分光法で Si の微結晶膜を評価する方法は、太陽光発電やディスプレイ分野で多数の先行研究があり、評価方法はある程度確立されている。

μ -Si における結晶化率の解析方法は幾通りか提案されているが、結晶ピーク(c-Si)、境界領域(GB:Grain Boundary)を結晶成分、a-Si の TO 成分をアモルファス成分として、全体に対する結晶成分の割合を結晶化率(X_c)とする方法が一般的に用いられる。

図9に解析例を示す。

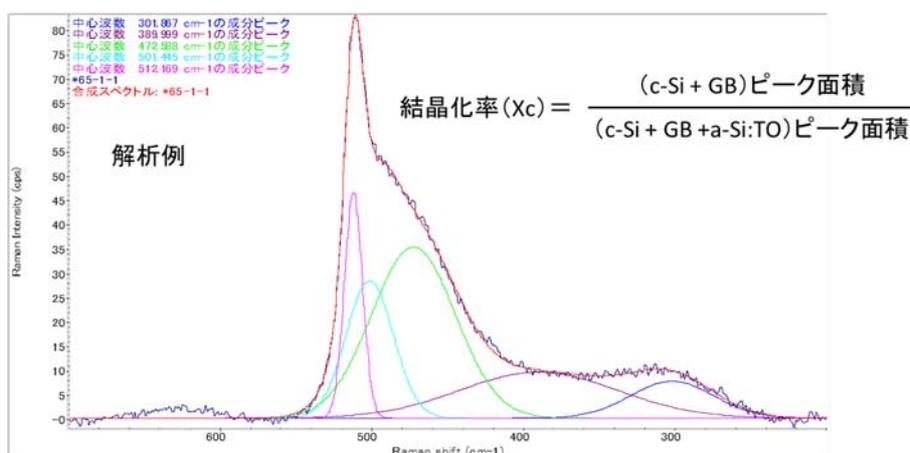


図 9 μ -Si のラマン分光スペクトルと結晶化率の解析例

ラマン分光では、結晶化率(X_c)などの評価を行ったが、XRD では結晶格子の状態を評価することができる。図10に μ -Si の XRD 測定データと解析結果の例を示す。ラマン分光で微結晶化が確認された全ての μ -Si サンプルで、Si 由来の結晶相(111, 220, 311)が観測された。

No.	2 θ (deg)	d(Å)	高さ(cps)	FWHM(deg)	積分強度(cps·deg)	積分幅(deg)	結晶子サイズ(Å)
1	28.3553	3.14497	218.108	0.69385	307.044	1.407765	123.341
2	47.24(6)	1.923(2)	57.8093	0.977007	76.852	1.329406	92.6911
3	55.9978	1.64083	64.6404	1.03252	96.8851	1.498831	91.0125

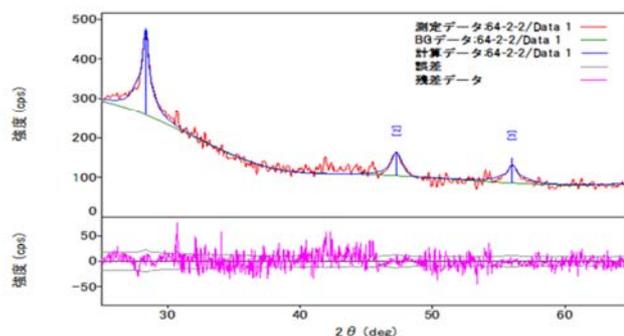


図 10 XRD 測定データ及び解析例

分光エリプソメトリは、光学薄膜の評価を行う上で、非常に有用な分析手段であり、導波モードセンサの光学設計シミュレーションに用いる nk テーブルを得るための、ほとんど唯一の分析手段である。多層膜においては、各層のモデルと分散式に単独で最適した条件を用い、各層の膜厚だけフィッティングすることで、より良い結果が得られることが多い。

反射層の解析例として、 $\mu\text{c-SiGe}$ (Ge 分率 30%) を図 11、導波路層の解析例として、 SiO_2 を図 12 に示す。

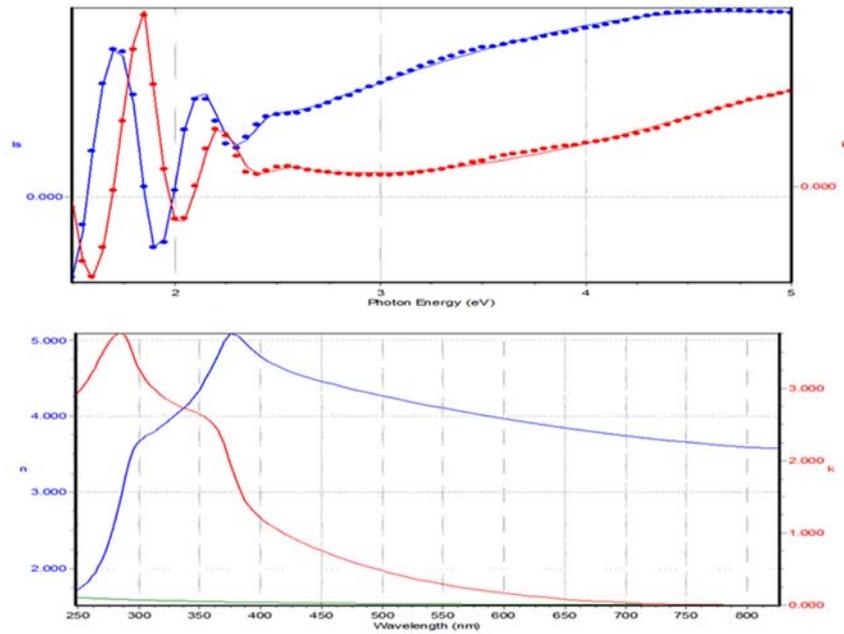


図 11 $\mu\text{c-SiGe}$ エリプソデータ(上:測定値+フィット結果、下:nk 解析結果)

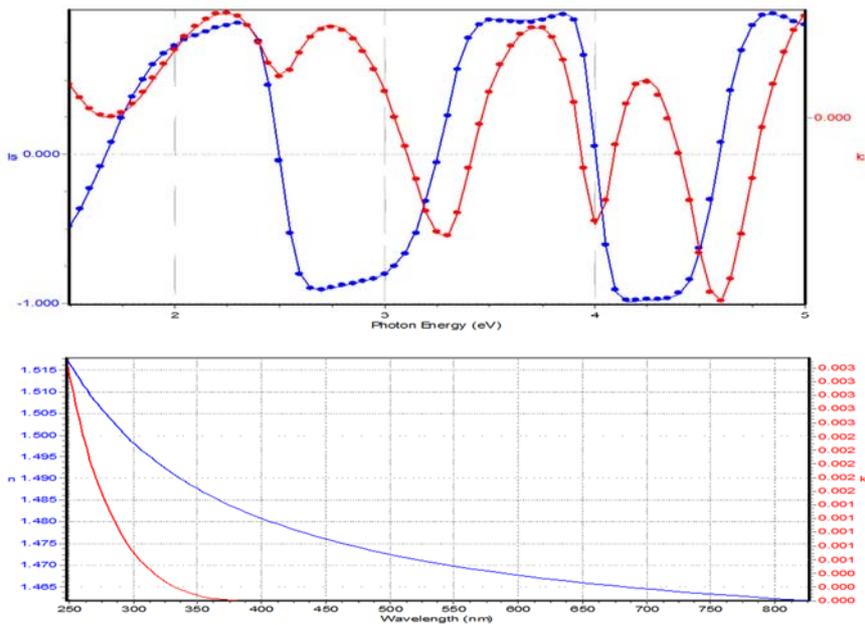


図 12 SiO_2 エリプソデータ(上:測定値+フィット結果、下:nk 解析結果)

2-3-2 評価用光導波モードセンサの試作

試作したセンサの外観を図13に示す。



図 13 評価用導波モードセンサ外観

この評価用導波モードセンサは、図14に示すように、従来技術のセンサチップと開発品を同一条件で比較できるよう、外形の異なるセンサチップ別のサンプルホルダをビス 2 本で簡単に取り替えることができる。

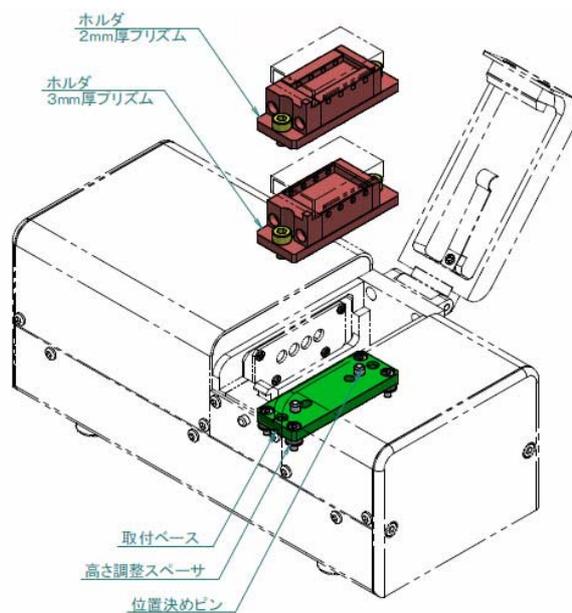


図 14 サンプルホルダ交換機構

2-3-3 光導波モードセンサによる実証試験

センサチップの評価には、一定の屈折率変化を正確に再現しなければならない。

一定の屈折率変化を正確に再現するためには、試料溶液そのものの屈折率(バルクの屈折率)が異なる2種類の溶液を測定し、それぞれのディップボトム波長の差($\Delta\lambda$)の大きさを実測する方法が適している。導波モードセンサは基本的に試料に水溶液を想定して設計されており、水溶液の屈折率を変えるには、水溶性であって水より屈折率が高い物質を溶かすのが一般的である。そのような溶質として、塩類や糖質が好適であり、今回は食塩(塩化ナトリウム)を用いた。

従来技術製品で純水と10wt.%食塩水(屈折率変化量=0.0175)を測定すると、 $\Delta\lambda=28\text{nm}$ であった。性能比較のため、開発品について同じ条件で測定を行い、従来技術と同等の性能を示した新技術のセンサチップ設計例および測定結果を図15に示す。

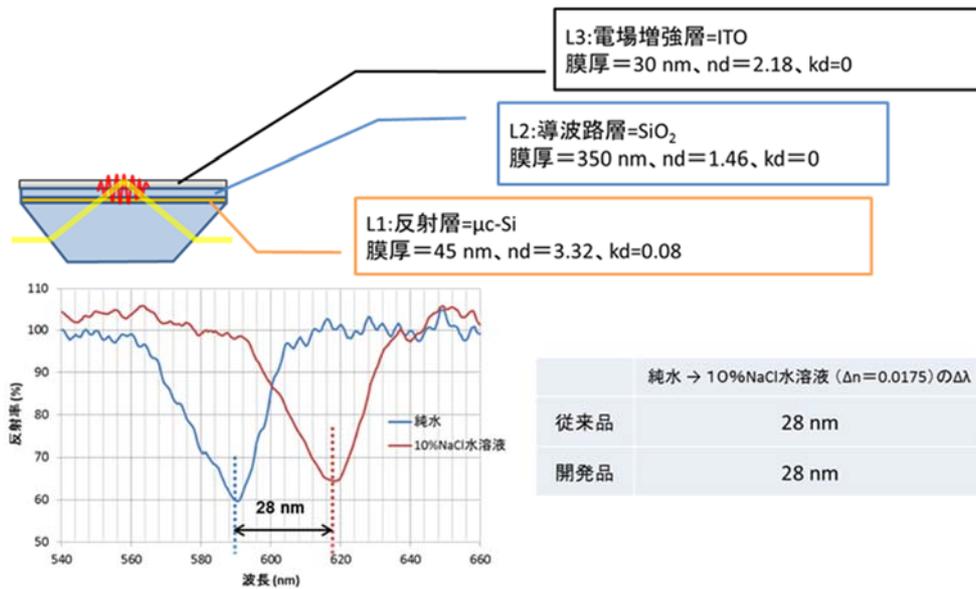


図 15 試作品の性能評価実測データ

2-4 専用製造装置と量産プロセスの開発

2-4-1 プリズム固定用ジグ

下に示す5項目を満たすような、プリズム用固定ジグを開発した。

1. 200φの円内に 100 個のプリズムが安定に固定できること。
2. センシング面(上面)のみスパッタされ、他の光学面(両方の斜面)はスパッタされないような構造であること。
3. 洗浄がしやすいこと。
4. プリズムを固定ジグへセット・取出しする作業をスムーズに行えるような構造であること。
5. ジグ裏面をヒーターで加熱し、その熱を速やか、かつ均一に 100 個のプリズム伝えられること。

図16に示す2次試作品で、不具合点が全て解消され、目標とする性能を達成した。

2次試作品

- ・マスク+クッション材(カーボンシート)+ホルダーの3層構造

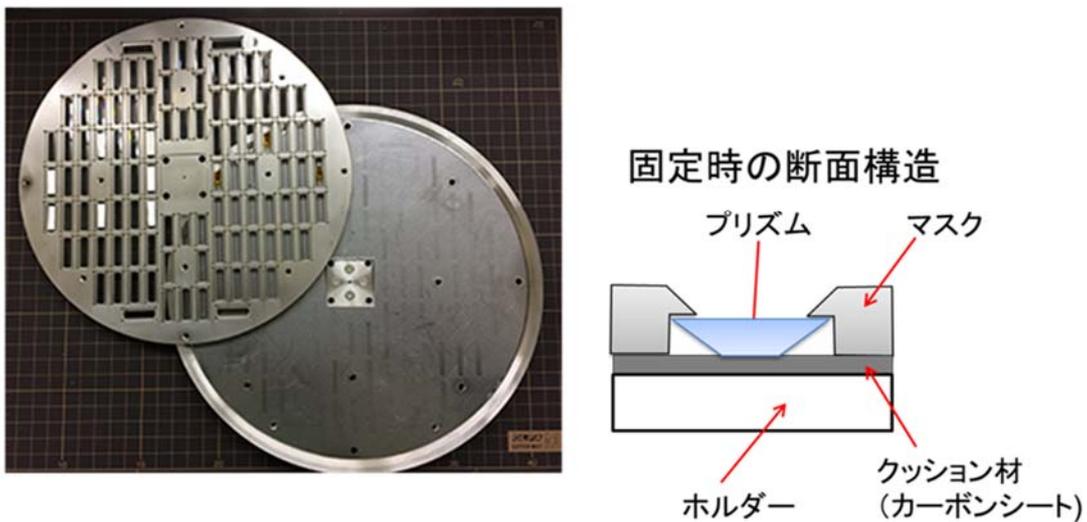


図 16 プリズム用固定ジグ2次試作品の外観と断面構造

2-4-2 専用 PVD 装置

1バッチあたりの生産量を 100 として、5 バッチ/日として、月に 20 日稼働したとして、一月あたり $100 \times 5 \times 20 = 10,000$ 個の生産を想定して、試作した RF マグネトロンスパッタリング式の PVD 装置を図17に示す。



図 17 専用 PVD 装置外観

その後、図18に示すように、研究開発を進める中で発生した課題に対応して、オプションユニットを加え、ノウハウの詰まった専用 PVD 装置を開発した。

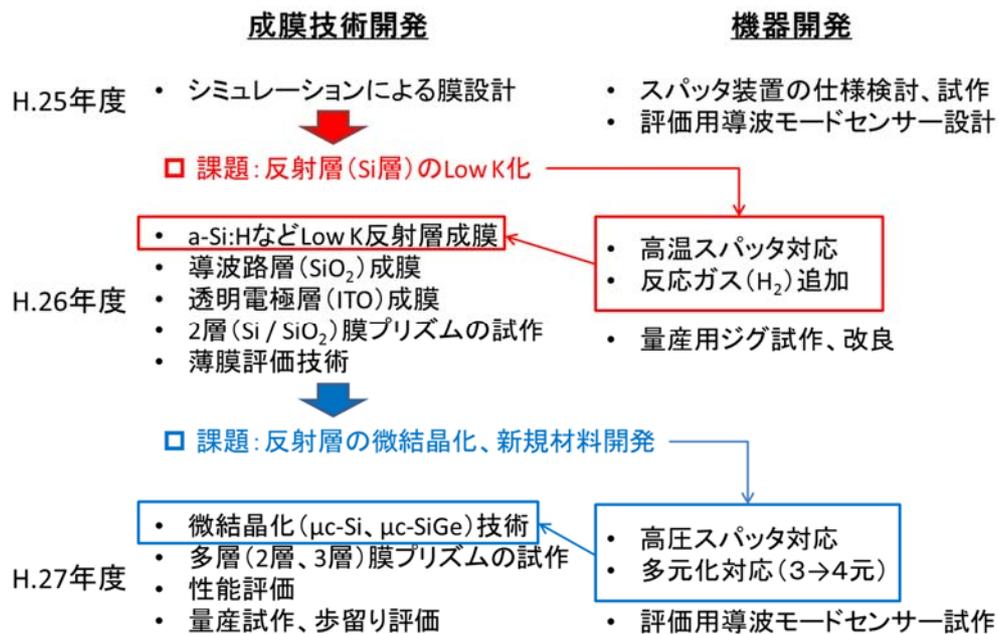


図 18 技術課題と機器開発の関係

2-4-3 製造プロセスとコスト

複数回の量産試作を行い、品質面から、1バッチあたりの歩留りを調べた。

良品、不良品の評価は、評価用導波モードセンサを用いて行い、センサチップ1枚中、4チャンネル分のディップボトム波長を以下の観点で評価した。

- (1) 波長のバラつきが、装置仕様の膜厚バラつき(±5%)による範囲であること。
- (2) 4チャンネルのディップボトムをソフトウェアで自動的かつ安定して検出できること

(1)に関しては、1層あたりの膜厚バラつきを(±5%)として、3層形成した時、ディップボトム波長のバラつきは、シミュレーションより約±30nmとなった。実際には全体で見た時のディップボトム波長のバラつきは、概ね予想される範囲とほぼ一致していた。ディップボトム波長のバラつきが、±30nmというところかなり大きいように感じるが、ノーマルチップ用途で検出感度のバラつきに換算すると、誤差の上限と下限で数%にしかならないので、品質上の問題はない。

上記2点を基準に検査したところ、1バッチ中の不良品はすべて(2)が原因であった。

不良品は、プリズム固定ジグの辺縁部に集中し、不良パターンは似通っていた。

殆どの場合、4チャンネルの内、両端のどちらか(ch.1またはch.4)のディップ形状が崩れてしまうことで、ソフトウェアによる自動ディップボトム検出ができなかったことで不良となっていた。

不良は辺縁部に集中していることから、成膜時に膜厚を平均化するために固定ジグを回転させる上で、中心部と辺縁部で移動速度の差が大きくなってしまふことが原因と考えられる。具体的には、図19に示すように、膜材料の堆積速度に対してワーク移動速度が大きくなりすぎると、マスクの近くでは膜が形成されづらくなる。これは、傘を進行方向に向けて走るとき、雨が小ぶりなら早く走るほど濡れなくなるのと同じ現象であり、今後、ジグの回転数を膜厚の平均化に影響しない範囲でどこまで遅くできるか、細かく検討する予定である。

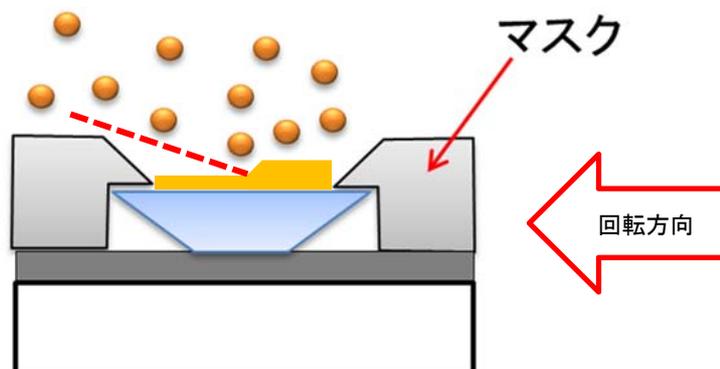


図 19 ジグ(マスク)回転の膜厚への影響

5 バッチ同条件で連続して製造し、全てのチップを上記のように評価したところ、バッチごとに不良率は、8-14% (平均 12%) であった。

歩留り評価にあわせて、製造に必要な材料、ユーティリティ、機器のメンテナンス費用を月産 10,000 個 (不良品含む) で見積もったところ、1 バッチあたりのコストは、表 1 に示すように約 2 万円となった。

表 1 量産時の 1 バッチコスト

バッチあたりコスト

材料			ユーティリティ		メンテナンス	合計
プリズム	カーボンシート	ターゲット	ガス	電気	リフレクター洗浄	
¥16,000	¥560	¥1,050	¥150	¥320	¥1,500	¥19,580

これを、1 バッチあたりの良品数 = $100 \times (1 - 0.12) = 88$ 個で割返すと、センサチップ (多層コートプリズム) の 1 個あたりの製造コストは、表 2 に示すように ¥223 となり、目標であった ¥1,000 を大幅に下回ることに成功した。

表 2 センサチップコスト製造コスト

センサチップコスト

多層膜コートプリズム	テープ	セル部	合計
¥223	¥15	¥100	¥338

また、試験溶液を保持するためのセルや組み立てに使用するテープを足しても、合計 ¥338 (完成品製造コスト) であり、市場調査から販売価格を完成品で ¥2,000 以下に押えられれば普及の可能性があるという観点から、事業化における大きなブレークスルーを達成できたと考える。

量産プロセスで試作した、多層膜コートプリズムとセルを一体化した完成品を図 20 に示す。



図 20 センサチップ完成品 (左) と多層膜コートプリズム (右)

第3章 全体総括

光導波モードセンサは、全く新しい溶液系(バイオ)センサであり、既存のセンシング技術に対して、検出感度やモバイル性などの点で多くの優位性を持つ。この素晴らしいセンシング技術を世の中に普及させるためには、越えなければならない幾つかの壁があり、測定器(ハード)については壁を乗り越え、市場から一定の評価を得ている。次の壁は、センサチップ(消耗品)のコストであり、少なくとも製造コストを現在の3分の1以下にするため、従来技術の延長上にある改善だけでは越えられそうになく、新技術によるブレークスルーが必要であった。

そこで、本事業では、図21に示すように、原材料と製造工程を変える抜本的対策をとるため、3年間に渡って、地道だが革新的な研究開発を実施した。

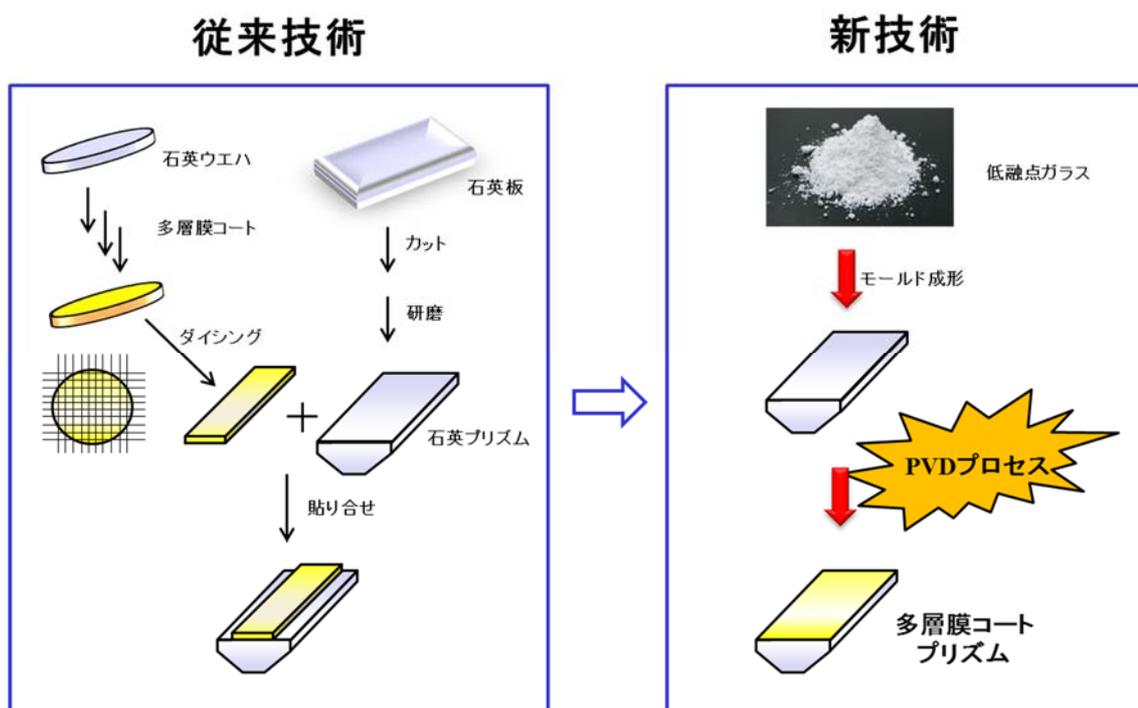


図 21 従来技術と新技術の比較

当初、コストダウンによるある程度の性能低下は避けられないと予想しており、性能低下幅を実用性に影響しない範囲(屈折率変化に対する検出感度が従来技術の70%以上)に抑え、製造コストを従来技術の3分の1以下に下げること重点を置く計画であった。

そこで、基本計画では、コストダウンの達成を必要条件として、機器や原材料の選定を行ったが、実際に研究開発を開始すると、通常の PVD プロセスでは、性能低下幅が予想より大きくなりそうなのがわかり、そこから新しい PVD プロセス開発への挑戦が始まった。

開発計画の中核である PVD (Physical Vapor Deposition) に対比される技術として、CVD (Chemical Vapor Deposition) と真空蒸着がある。3 つとも真空プロセスであり、産業用として広く利用されている。当然、事前に3 つの内どの技術が今回の開発に適しているか綿密に調査し、PVD が最適であるという確信を得た上で決めたものであるが、一部の方から CVD や真空蒸着の方が良いのではないかという指摘があったので、ここでそれについて言及しておく。

確かに、膜厚制御や光学特性などの品質面と量産性について、設備コストや開発期間を無視すれば、真空蒸着や CVD が優れている面もある。しかしながら、製造のコストダウンが目標である以上、設備コストを無視できるはずもなく、対象の市場動向を意識すれば、開発スピードは同等に重要である。加えて、開発主体が中小(ベンチャー)企業であるという要因も無視できない。

本事業では、「量産プロセス開発」というキーワードもあったため、CVD や蒸着が量産プロセスに対して親和性が高いという一般常識にとらわれると本質がみえなくなる。ひとくちに量産といっても、全く新しいセンシング技術の消耗品を量産するのと、太陽光パネルや自動車部品を量産するのとでは、全く次元の違う話であり、当然、想定している製造規模はゼロが3 つ以上違うのである。また、技術系ベンチャー企業の製品開発は、世の中の注目が集まる期間と新商品発表をピンポイントで合わせることが極めて重要であり、そうでなければ、製品の性能が良いだけで売れることなどほとんどありえないことは、かつて大企業や公的機関で研究していた方々にはあまり理解されていない。

PVD プロセスが有利な点は、設備そのものの価格もさることながら、設置や維持に係るコストが他に比べて安く、なにより、成膜条件の変更が容易で調整幅が大きいことである。また、装置が比較的小型なものから大型モデルまで幅広くラインナップされ、製造規模に合わせて設備の増強が容易であることも良い点といえよう。つまり、開発は小規模な装置で短期間に終わらせ、最適なタイミングで市場投入し、需要に呼応して生産量を柔軟に変更可能するには、PVD プロセスが最適なのである。

PVD プロセスの中でも、本事業で選んだ RF マグネトロンスパッタリング法は、絶縁性物質の成膜が可能であることに加え、各種ユニットの追加により、条件をかなり柔軟に設定することができる。この装置特性が、3 年間で目標を達成したのみならず、画期的な新技術の発見(記載時点で特許出願中)し、目標以上の成果を上げられたことに深く寄与しているのは間違いない。

さて、本事業の成果について、総合的な目標値は、「検出感度を従来技術の 70% 以上に保ちつつ、製造コスト3分の1(¥1,000/個)以下に下げること。」であり、最終的に、「検出感度は、従来技術と全く同じ(100%)に保ちつつ、製造コストを13分の1以下(¥223)に下げること」に成功したのである。

詳細は、本論に譲るとして、上記の成果を得ることができた技術的な要因は、大きく2 つある。

一つは、反射層のシリコンやシリコンゲルマニウムを微結晶化する技術を完成させたことで、もう一つは、従来基本としていた2層コート構造(反射層+導波路層)に対し、3層目に電場増強の役割を担わせる3層コート構造(反射層+導波路層+電場増強層)という新発想を採り入れたことである。

RF マグネトロンスパッタリング法で Si や SiGe の微結晶化に成功したといっても、単結晶シリコン(c-Si)の物性を完全に模倣できるわけでないが、導波モードセンサ用途において、実用および製造上有効な技術であることは疑いなく、新発見の電場増強層を組み合わせる方法と合わせて、本研究開発の技術的ハイライトとなった。

他方、量産プロセス開発という切り口では、技術課題に対応して装置にオプションユニットを組み込んでいき、ノウハウ満載の製造装置を作り上げたことが一番の成果である。

くわえて、産総研 NPF の協力により、結晶化、膜厚、光学定数など関連する様々な物性についての評価技術を確立し、貴重なデータとともに評価手法のノウハウを得ることができた。

今後の予定

本格的な製造へ向け、3年間の研究開発で得た設備、データ、ノウハウのブラッシュアップを行うべく、6ヶ月間を目処に追加研究を行う。

また、水面下で進めていた「導波モードセンサ事業」のパートナー探しでも進展があり、今年度末に産総研・シーアンドアイ(当社)・パートナー企業の3者で共同研究契約を締結する運びとなった。平成 28 年度の4月より、新たなパートナーと共同研究を開始する他、以前からの提携先と本事業の成果を使った新しい用途開発の話を現在進めているところである。

他方、測定器の改良が夏頃までに終わる見通しとなっており、本事業の成果と合わせ、秋口の展示会へ出品を予定している。