(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2021年11月25日(25.11.2021)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2021/235496 A1

(51) 国際特許分類:
B32B 15/04 (2006.01) *G02F 1/03* (2006.01)

(21) 国際出願番号： PCT/JP2021/019037

(22) 国際出願日： 2021年5月19日(19.05.2021)

(25) 国際出願の言語： 日本語

(26) 国際公開の言語： 日本語

(30) 優先権データ：
特願 2020-088349 2020年5月20日(20.05.2020) JP

(71) 出願人：日本碍子株式会社(**NGK INSULATORS, LTD.**) [JP/JP]；〒4678530 愛知県名古屋市瑞穂区須田町２番５６号 Aichi (JP).

(72) 発明者：服 部 良 祐 (**HATTORI Ryosuke**)；〒4678530 愛知県名古屋市瑞穂区須田町２番５６号 日本碍子株式会社内 Aichi (JP). 多 井 知義(**TAI Tomoyoshi**)；〒4678530 愛知県名古屋市瑞穂区須田町２番５６号 日本碍子株式会社内 Aichi (JP). 浅 井 圭一郎(**ASAI Keiichiro**)；〒4678530 愛知県名古屋市瑞穂区須田町２番５６号 日本碍子株式会社内 Aichi (JP). 近藤 順悟(**KONDO Jungo**)；〒4678530 愛知県名古屋市瑞穂区須田町２番５６号 日本碍子株式会社内 Aichi (JP).

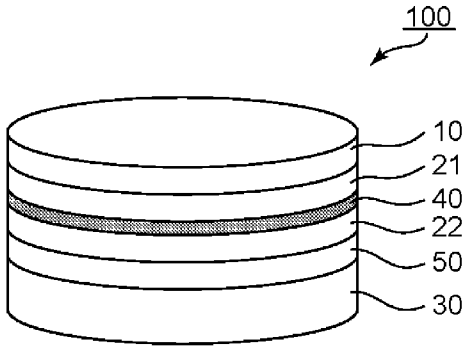
(74) 代理人：籾 井 孝 文 (**MOMII Takafumi**)；〒5300004 大阪府大阪市北区堂島浜１丁目４番４号 アクア堂島東館７階 Osaka (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能)：AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能)：ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(54) **Title:** COMPOSITE SUBSTRATE FOR ELECTRO-OPTICAL ELEMENT

(54) 発明の名称： 電気光学素子用複合基板



(57) **Abstract:** Provided is a composite substrate with which it is possible to realize an electro-optical element of very thin profile, in which: peeling is prominently inhibited; and when configured as an electro-optical element, light propagation loss is reduced, high-speed and low-voltage driving is made possible, and excellent reliability can be maintained even in extreme high-temperature environments. This composite substrate (100) for an electro-optical element according to an embodiment has, in the sequence listed, an electro-optical crystal substrate (10) having an electro-optical effect, a first high-dielectric-constant layer (21), a second high-dielectric-constant layer (22), and a support substrate (30). The first high-dielectric-constant layer (21) and the second high-dielectric-constant layer (22) are directly bonded to each other, and an amorphous layer (40) is formed at the bonding interface between the high-dielectric-constant layer (21) and the second high-dielectric-constant layer (22).

WO 2021/235496 A1

[続葉有]

添付公開書類：

一　国際調査報告（条約第21条(3)）

(57) 要約：はがれが顕著に抑制され、ならびに、電気光学素子とした場合に光の伝搬損失が小さく、高速および低電圧駆動が可能であり、さらに、過酷な高温環境下においても優れた信頼性を維持し得る非常に薄型の電気光学素子を実現し得る複合基板が提供される。本発明の実施形態による電気光学素子用複合基板（１００）は、電気光学効果を有する電気光学結晶基板（１０）と、第１の高誘電率層（２１）と、第２の高誘電率層（２２）と、支持基板（３０）と、をこの順に有する。第１の高誘電率層（２１）と第２の高誘電率層（２２）とは直接接合されており、第１の高誘電率層（２１）と第２の高誘電率層（２２）との接合界面にはアモルファス層（４０）が形成されている。

明　細　書

発明の名称 ： 電気光学素子用複合基板

技術分野

[0001] 本発明は、電気光学素子用複合基板に関する。

背景技術

[0002] 種々の電気光学素子が知られている。電気光学素子は、電気光学効果を利用して、電気信号を光信号に変換することができる。電気光学素子は、例えば光電波融合通信に採用されており、高速かつ大容量な通信、低消費電力化（低駆動電圧化）、低フットプリントを実現するために、その開発が進められている。このため、電気光学素子は、例えば、複合基板を用いた構成の採用が始まっている。電気光学素子用複合基板としては、電気光学効果を有する電気光学結晶基板と支持基板とが薄膜層（例えば、高誘電率酸化膜）を介した直接接合により一体化されている複合基板が知られている。しかし、このような複合基板は、以下のような問題がある。電気光学結晶基板と薄膜層とを直接接合した場合、光の伝搬損失が発生する場合がある。薄膜層と支持基板を直接接合した場合、高速駆動が困難となる場合があり、状況によっては接合自体がうまくいかず複合基板が得られない場合がある。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特許第４１７４３７７号

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 本発明の主たる目的は、はがれが顕著に抑制され、ならびに、電気光学素子とした場合に光の伝搬損失が小さく、高速および低電圧駆動が可能であり、さらに、過酷な高温環境下においても優れた信頼性を維持し得る非常に薄型の電気光学素子を実現し得る複合基板を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0005] 本発明の実施形態による電気光学素子用複合基板は、電気光学効果を有する電気光学結晶基板と、第１の高誘電率層と、第２の高誘電率層と、支持基板と、をこの順に有する。該第１の高誘電率層と該第２の高誘電率層とは直接接合されており、該第１の高誘電率層と該第２の高誘電率層との接合界面にはアモルファス層が形成されている。

１つの実施形態においては、上記電気光学素子用複合基板は、上記電気光学結晶基板に上記第１の高誘電率層が直接形成され、上記支持基板に上記第２の高誘電率層が直接形成されている。該支持基板は酸化シリコンを主成分として含み、該支持基板におけるアルゴン濃度は１．０原子％以下である。１つの実施形態においては、上記電気光学素子用複合基板は、上記電気光学結晶基板に上記第１の高誘電率層が直接形成され、上記支持基板に低誘電率層が直接形成され、該低誘電率層に上記第２の高誘電率層が直接形成されている。該低誘電率層は酸化シリコンを主成分として含み、該低誘電率層におけるアルゴン濃度は１．０原子％以下である。これらの電気光学素子用複合基板においては、上記第１の高誘電率層および上記第２の高誘電率層におけるアルゴン濃度は、それぞれ１．０原子％～１０原子％であってもよい。

１つの実施形態においては、上記電気光学素子用複合基板は、上記電気光学結晶基板に上記第１の高誘電率層が直接形成され、上記支持基板に低誘電率層が直接形成され、該低誘電率層に上記第２の高誘電率層が直接形成されている。該低誘電率層は、酸化シリコン、酸化アルミニウム、フッ化マグネシウムおよびフッ化カルシウムから選択される１つで構成されている。

１つの実施形態においては、上記電気光学素子用複合基板は、上記電気光学結晶基板に上記第１の高誘電率層が直接形成され、上記支持基板に上記第２の高誘電率層が直接形成されている。該電気光学結晶基板の厚みは０．１μｍ以上１．０μｍ未満であり、該第１の高誘電率層の厚みは０．０１μｍ以上であり、該第１の高誘電率層および該第２の高誘電率層の合計厚みは０．１０μｍ以下である。この電気光学素子用複合基板は、上記支持基板に直接形成された低誘電率層をさらに有し、該低誘電率層に上記第２の高誘電率層

が直接形成されていてもよい。

１つの実施形態においては、上記支持基板は、シリコン、ガラス、サイアロン、ムライト、窒化アルミニウム、窒化シリコン、酸化マグネシウム、サファイア、石英、水晶、窒化ガリウム、炭化シリコンおよび酸化ガリウムから選択される１つで構成されている。

１つの実施形態においては、上記電気光学結晶基板の厚みは０．１μｍ～０．８μｍである。１つの実施形態においては、上記電気光学結晶基板の厚みは０．２μｍ～０．６μｍである。

１つの実施形態においては、上記電気光学結晶基板は、ニオブ酸リチウム、タンタル酸リチウム、チタン酸リン酸カリウム、ニオブ酸カリウム・リチウム、ニオブ酸カリウム、タンタル酸・ニオブ酸カリウム、および、ニオブ酸リチウムとタンタル酸リチウムとの固溶体から選択される１つで構成されている。

１つの実施形態においては、上記第１の高誘電率層の厚みは０．０１μｍ～０．０８μｍであり、上記第２の高誘電率層の厚みは０．００１μｍ～０．０４μｍである。

１つの実施形態においては、上記第１の高誘電率層および前記第２の高誘電率層は、それぞれ、酸化タンタル、酸化ニオブ、酸化チタン、酸化アルミニウム、酸化ハフニウムおよびシリコンから選択される１つで構成されている。

１つの実施形態においては、上記低誘電率層の厚みは１０μｍを超えて２０μｍ以下である。

発明の効果

[0006] 本発明の実施形態によれば、電気光学素子用複合基板において２つの高誘電率層を設け、当該２つの高誘電率層を直接接合して電気光学結晶基板と支持基板とを一体化することにより、はがれが顕著に抑制され、ならびに、電気光学素子とした場合に光の伝搬損失が小さく、かつ、高速および低電圧駆動が可能な複合基板を実現することができる。１つの実施形態においては、

支持基板または当該支持基板に直接形成された低誘電率層を、酸化シリコンを主成分として構成し、かつ、支持基板または低誘電率層におけるアルゴン濃度を１．０原子％以下とすることにより、上記のような優れた効果を維持しつつ、過酷な高温環境下においても優れた信頼性を維持し得る非常に薄型の電気光学素子を実現することができる。１つの実施形態においては、第１の高誘電率層の厚みを所定値以上とし、かつ、第１の高誘電率層および第２の高誘電率層の合計厚みを所定値以下とすることにより、上記のような優れた効果を維持しつつ、電気光学結晶基板を非常に薄くすることができ、結果として、きわめて薄型の電気光学素子を実現することができる。

図面の簡単な説明

[0007] [図1]本発明の１つの実施形態による電気光学素子用複合基板の概略斜視図である。

[図2]図１の電気光学素子用複合基板の概略断面図である。

[図3]比較例１、３、５、７、９および１１の電気光学素子用複合基板の概略断面図である。

[図4]比較例２、４、６、８、１０および１２の電気光学素子用複合基板の概略断面図である。

[図5]実施例７の電気光学素子用複合基板における第１の高誘電率層と第２の高誘電率層との接合界面の状態を示す透過型電子顕微鏡画像である。

発明を実施するための形態

[0008] 以下、本発明の実施形態について説明するが、本発明はこれらの実施形態には限定されない。

[0009] Ａ．電気光学素子用複合基板の全体構成

図１は、本発明の１つの実施形態による電気光学素子用複合基板（以下、単に複合基板と称する場合がある）の概略斜視図であり；図２は、図１の複合基板の概略断面図である。本発明の実施形態による複合基板は、代表的には図１に示すように、いわゆるウェハの形態で製造され得る。複合基板のサイズは、目的に応じて適切に設定され得る。例えば、ウェハの直径は４イン

チ（約１０ｃｍ）であり得る。通常、一枚の複合基板から複数の電気光学素子が製造され得る。なお、複合基板は、ウェハの形態に限定されず、様々な形態で製造され提供されてもよい。

[0010] 図示例の複合基板１００は、電気光学効果を有する電気光学結晶基板１０と、第１の高誘電率層２１と、第２の高誘電率層２２と、支持基板３０と、をこの順に有する。本発明の実施形態においては、第１の高誘電率層２１と第２の高誘電率層２２とが直接接合されている。２つの高誘電率層の直接接合により、電気光学結晶基板１０と支持基板３０とが一体化されている。例えば、第１の高誘電率層２１は電気光学結晶基板１０表面にスパッタリングにより形成され；第２の高誘電率層２２は支持基板３０表面にスパッタリングにより形成され；それぞれの積層体の第１の高誘電率層２１と第２の高誘電率層２２とが直接接合されている。なお、代表的には図示例のように、直接接合の接合界面にはアモルファス層４０が形成されている。図示例においては、支持基板３０の第２の高誘電率層２２側には、低誘電率層５０が形成されている。低誘電率層５０は、目的に応じて設けられる任意の層であり、省略されていてもよい。複合基板１００は、図示しない任意の層をさらに有していてもよい。そのような層の種類・機能、数、組み合わせ、配置位置等は、目的に応じて適切に設定され得る。特に、支持基板３０または低誘電率層５０（存在する場合）よりも下方（電気光学結晶基板と反対側）の構成は、目的に応じて適切に設定され得る。例えば、支持基板３０または低誘電率層５０（存在する場合）の下方に金属膜を設けてもよい。このような金属膜を設けることにより、複合基板から電気光学素子を作製した場合に、電気光学素子の出力信号における意図しないリップル（ノイズ、変動）を抑制し、正常な動作を維持することができる。なお、本明細書において「高誘電率層」および「低誘電率層」は、第１の高誘電率層２１および第２の高誘電率層２２の誘電率が、相対的に、低誘電率層５０の誘電率より大きいことを意味する。低誘電率層５０が設けられていない場合には、第１の高誘電率層２１および第２の高誘電率層２２の誘電率が、相対的に、支持基板３０の誘電率

より大きいことを意味する。すなわち、第１の高誘電率層２１、第２の高誘電率層２２および低誘電率層５０は、それぞれの層の誘電率の具体的な値により規定されるものではない。また、これらの層の誘電率と電気光学結晶基板の誘電率との大小関係は問われない。

[0011] 電気光学結晶基板１０と支持基板３０とを直接接合により一体化することにより、複合基板の剥離を良好に抑制することができ、結果として、このような剥離に起因する電気光学結晶基板の損傷（例えば、クラック）を良好に抑制することができる。さらに、接着剤を用いることなく直接接合することにより、接着剤の変質および変形に起因する悪影響を排除することができるので、高い信頼性を実現することができる。加えて、接着剤による誘電損失もない。

[0012] 本発明の実施形態によれば、第１の高誘電率層２１と第２の高誘電率層２２とを直接接合することにより、以下の利点が得られ得る。電気光学素子を薄型化（代表的には、電気光学結晶基板の厚みを１μｍ以下）する場合、支持基板との複合化により補強することが好ましい。さらに、このような複合基板（電気光学素子）において速度整合条件を満足させて高速および低電圧駆動を実現するために、高誘電率層を設けることが有効であることがわかった。これまでは電気光学結晶基板と支持基板（低誘電率基板）だけで開発が進められてきたが、上記のように電気光学結晶基板の厚みが１μｍ以下になってくると、マイクロ波実効誘電率（屈折率）が小さくなりすぎる場合があり、電気光学結晶基板と支持基板との間に高誘電率層を設けることにより、マイクロ波実効誘電率（屈折率）の過剰な低下を抑制することができ、速度整合条件を満足させることができる。ここで、高誘電率層が単一層である場合、直接接合により電気光学結晶基板と支持基板とを一体化するためには、電気光学結晶基板と高誘電率層との直接接合、あるいは、高誘電率層と支持基板との直接接合が必要となる。本発明者らは、単一の高誘電率層を介した直接接合において形成され得るアモルファス層の位置が電気光学素子（例えば、光変調器）の特性に大きな影響を与えることを新たに見出し、本発明を

完成するに至った。すなわち、電気光学結晶基板と高誘電率層とを直接接合すると、接合界面に形成されたアモルファス層が電気光学結晶基板に進展する。その結果、電気光学結晶基板において光の散乱および／または吸収が起こり、加えて、電気光学結晶基板の電気光学定数が不十分なものとなる。高誘電率層と支持基板とを直接接合すると、接合界面に形成されたアモルファス層を介して支持基板を構成する材料（実質的には、原子）が高誘電率層に拡散・移行し得る。その結果、高誘電率層の誘電率の低下および／または導電率の上昇が起こり、電気シールド効果が生じる場合がある。その結果、速度整合条件を満足させることができず、高速および低電圧駆動が困難となる場合がある。さらに、高誘電率層と支持基板とを直接接合しようと試みても接合自体がうまくいかず、複合基板が得られない場合がある。このような単一の高誘電率層を介した直接接合に対し、本発明の実施形態によれば、２つの高誘電率層を直接接合して電気光学結晶基板と支持基板とを一体化することにより、２つの高誘電率層の間にアモルファス層を形成することができ、アモルファス層を電気光学結晶基板および支持基板のいずれからも隔離することができる。その結果、複合基板の効果および高誘電率層の効果をいずれも良好に維持しつつ、アモルファス層の悪影響を防止することができる。結果として、はがれが顕著に抑制され、ならびに、電気光学素子とした場合に光の伝搬損失が小さく、かつ、高速および低電圧駆動が可能な複合基板を実現することができる。

[0013] 本明細書において「直接接合」とは、接着剤を介在させることなく複合基板の構成要素（図１および図２の例では第１の高誘電率層２１と第２の高誘電率層２２）が接合していることを意味する。直接接合の形態は、互いに接合される層または基板の構成に応じて適切に設定され得る。例えば、直接接合は、以下の手順で実現され得る。高真空チャンバー内（例えば、１×１０$^{-6}$Ｐａ程度）において、接合される構成要素（層または基板）のそれぞれの接合面に中性化ビームを照射する。これより、各接合面が活性化される。次いで、真空雰囲気で、活性化された接合面同士を接触させ、常温で接合する。

この接合時の荷重は、例えば１００Ｎ～２００００Ｎであり得る。１つの実施形態においては、中性化ビームによる表面活性化を行う際には、チャンバーに不活性ガスを導入し、チャンバー内に配置した電極へ直流電源から高電圧を印加する。このような構成であれば、電極（正極）とチャンバー（負極）との間に生じる電界により電子が運動して、不活性ガスによる原子とイオンのビームが生成される。グリッドに達したビームのうち、イオンビームはグリッドで中和されるので、中性原子のビームが高速原子ビーム源から出射される。ビームを構成する原子種は、好ましくは不活性ガス元素（例えば、アルゴン（Ａｒ）、窒素（Ｎ））である。ビーム照射による活性化時の電圧は例えば０．５ｋＶ～２．０ｋＶであり、電流は例えば５０ｍＡ～２００ｍＡである。

[0014] １つの実施形態においては、支持基板は、代表的には酸化シリコンを主成分として含む。さらに、支持基板におけるアルゴン濃度は、代表的には１．０原子％以下であり、好ましくは０．８原子％以下である。支持基板におけるアルゴン濃度は小さいほど好ましく、その下限は例えば０．１原子％であり得る。支持基板をこのような構成とすることにより、以下のような効果が得られ得る。本発明の実施形態によれば、上記のとおり、電気光学結晶基板を例えば１μｍ程度まで薄型化しても、接合部分の剥がれを顕著に抑制することができる。一方、近年、電気光学結晶基板のさらなる薄型化が要望されている。これに関連して、本発明者らは、電気光学結晶基板を１．０μｍ未満（例えば０．６μｍ）まで薄型化すると、過酷な高温環境下（例えば、長期の加熱信頼試験後）において電気光学結晶基板がはがれる場合があることを新たに発見した。本発明者らは、このようなはがれに関して鋭意検討した結果、高誘電率層の膜質を向上させ、かつ、高誘電率層の厚みを薄くすることにより、過酷な高温環境下における電気光学結晶基板のはがれを顕著に抑制できることを見出した。例えば、高誘電率層のアルゴン濃度を代表的には１０原子％以下に制御し、かつ、高誘電率層の厚みを代表的には０．２μｍ以下に制御することにより、過酷な高温環境下においても電気光学結晶基板

のはがれを顕著に抑制できることを見出した。さらに、本発明者らは、このような優れた膜質を有しかつ薄い高誘電率層を形成するための要件を鋭意検討した結果、高誘電率層が形成される基板または層の状態を制御すればよいこと、さらに、第２の高誘電率層が形成される支持基板を、酸化シリコンを主成分として構成することにより、優れた膜質を有しかつ薄い第２の高誘電率層を形成できることを見出した。すなわち、支持基板が上記のような構成であれば、過酷な高温環境下においてもはがれが顕著に抑制された、非常に薄い（例えば、厚みが１μｍ未満の）電気光学結晶基板を有する複合基板を実現することができる。その結果、過酷な高温環境下においても優れた信頼性を維持し得る非常に薄型の電気光学素子を実現することができる。このような効果は、電気光学結晶基板をさらに薄型化して初めて認識された課題を解決するものであり、予期せぬ優れた効果である。上記のような過酷な高温環境下における電気光学結晶基板のはがれを抑制すれば、本発明の実施形態による他の優れた効果は過酷な高温環境下においても維持され得る。具体的には、本発明の実施形態によれば、過酷な高温環境下においても、光の伝搬損失を小さく維持することができ、かつ、高速および低電圧駆動を維持することができる。なお、支持基板におけるアルゴン濃度は、例えば、ゾルーゲル法を用いて形成することで支持基板を高純度化することにより、形成された支持基板に軟Ｘ線を照射することにより、あるいは、これらを組み合わせることにより、上記所望の範囲に制御することができる。また、本明細書においては、第１の高誘電率層および第２の高誘電率層をまとめて「高誘電率層」と称する場合がある。第１の高誘電率層と第２の高誘電率層とを区別する必要がある場合には、「第１」および「第２」を明記する。

[0015] １つの実施形態においては、低誘電率層を設ける場合に、低誘電率層が酸化シリコンを主成分として含み、かつ、低誘電率層におけるアルゴン濃度が１．０原子％以下となるよう構成してもよい。低誘電率層をこのような構成とすることにより、支持基板のアルゴン濃度を制御することによる効果と同様の効果が得られ得る。さらに、このような構成であれば、支持基板の構成

の選択肢を拡げることができる。例えば、支持基板を、酸化シリコン以外の材料で構成することができる。なお、低誘電率層におけるアルゴン濃度は、低誘電率層形成時（代表的には、スパッタリング時）のアルゴン分圧を調整することにより制御され得る。

[0016] 高誘電率層の厚みとしては、それぞれ任意の適切な厚みが採用され得る。高誘電率層の厚みはそれぞれ、例えば０．００１μｍ～１．０μｍであってもよく、また例えば０．００１μｍ～０．１μｍであってもよく、また例えば０．０１μｍ～０．１μｍであってもよい。高誘電率層の厚みがこのような範囲であれば、低誘電率層や支持基板によるマイクロ波実効誘電率（屈折率）の過剰な低下を抑制でき、同時に、マイクロ波実効誘電率の増加を小さくすることができるという利点がある。さらに、高誘電率層の厚みがこのような範囲であれば（特に、厚みが０．１μｍ以下であれば）、電気光学結晶基板を非常に薄く（例えば、１μｍ未満と）した場合であっても、過酷な高温環境下における電気光学結晶基板のはがれを顕著に抑制することができる。その結果、過酷な高温環境下においても優れた信頼性を維持し得る非常に薄型の電気光学素子を実現することができる。第１の高誘電率層および第２の高誘電率層の合計厚みは、例えば０．００５μｍ～０．２μｍであってもよく、また例えば０．００８μｍ～０．１５μｍであってもよく、また例えば０．０１μｍ～０．１μｍであってもよく、また例えば０．０３μｍ～０．０８μｍであってもよい。第１の高誘電率層および第２の高誘電率層の合計厚みをこのような範囲とすることにより、高誘電率層のそれぞれの厚みを制御することによる効果がさらに顕著なものとなり得る。

[0017] １つの実施形態においては、第１の高誘電率層の厚みは、代表的には０．０１μｍ以上であり、好ましくは０．０２μｍ以上であり、より好ましくは０．０３μｍ以上である。第１の高誘電率層の厚みは、例えば０．０８μｍ以下であってもよく、また例えば０．０７μｍ以下であってもよい。さらに、第１の高誘電率層および第２の高誘電率層の合計厚みは、代表的には０．１０μｍ以下であり、好ましくは０．０２μｍ～０．１０μｍであり、より

好ましくは０．０２μｍ～０．０８μｍであり、さらに好ましくは０．０３μｍ～０．０７μｍである。このような構成であれば、２つの高誘電率層を直接接合して電気光学結晶基板と支持基板とを一体化することによる優れた効果（代表的には、はがれの顕著な抑制、ならびに、電気光学素子とした場合の光の伝搬損失の抑制、かつ、高速および低電圧駆動の実現）を維持しつつ、電気光学結晶基板を非常に薄くすることができる。言い換えれば、このような構成であれば、電気光学結晶基板を例えば１μｍ未満、また例えば０．８μｍ以下、また例えば０．７μｍ以下、また例えば０．６μｍ以下まで薄くしても、上記の優れた効果を維持することができる。第１の高誘電率層の厚みが小さすぎると、直接接合時（より詳細には、中性化ビーム照射時）にアルゴン原子が電気光学結晶基板に拡散する、および／または、電気光学結晶基板の結晶性が劣化する場合がある。その結果、良好な駆動電圧を実現できなくなる、および／または、光の伝搬損失が大きくなる場合がある。合計厚みが大きすぎると、速度整合条件を満足することが困難となり、変調帯域が低下する場合がある。第２の高誘電率層の厚みとしては、第１の高誘電率層の厚みが上記所望の範囲を満足し、かつ、第１の高誘電率層および第２の高誘電率層の合計厚みが上記所望の範囲を満足する限りにおいて、任意の適切な厚みを採用することができる。第２の高誘電率層の厚みは、好ましくは０．００１μｍ～０．０４μｍであり、より好ましくは０．００５μｍ～０．０３５μｍであり、さらに好ましくは０．０１μｍ～０．０３μｍである。第２の高誘電率層の厚みがこのような範囲であれば、第２の高誘電率層の機能を十分に確保することができる。

[0018] 以下、複合基板の構成要素（基板または層）を具体的に説明する。

[0019] Ｂ．電気光学結晶基板

電気光学結晶基板１０は、電気光学素子において電気光学効果を有する層（機能層）となり得る。例えば、電気光学結晶基板１０の一部または全部は、電気光学素子において光を伝える光導波路となり得る。電気光学結晶基板１０は、外部に露出する上面と、複合基板内に位置する下面と、を有する。

電気光学結晶基板１０は、電気光学効果を有する材料の結晶で構成されている。具体的には、電気光学結晶基板１０は、電界が印加されると光学定数（例えば、屈折率）が変化し得る。１つの実施形態においては、電気光学結晶基板１０のｃ軸は、電気光学結晶基板１０に平行であり得る。すなわち、電気光学結晶基板１０は、Ｘカットの基板であってもよくＹカットの基板であってもよい。別の実施形態においては、電気光学結晶基板１０のｃ軸は、電気光学結晶基板１０に垂直であり得る。すなわち、電気光学結晶基板１０は、Ｚカットの基板であってもよい。電気光学結晶基板１０の厚みは、目的に応じて任意の適切な厚みに設定され得る。電気光学結晶基板１０の厚みは、例えば０．１μｍ～１０μｍであり得る。後述するように、複合基板は支持基板により補強されているので、電気光学結晶基板の厚みを薄くすることができる。電気光学結晶基板の厚みは、好ましくは０．２μｍ以上であり、より好ましくは０．３μｍ以上であり、さらに好ましくは０．４５μｍ以上である。電気光学結晶基板の厚みの下限がこのような範囲であれば、電気光学素子において光の伝搬損失を小さくすることができる。一方、電気光学結晶基板の厚みは、好ましくは５．０μｍ以下であり、より好ましくは２．８μｍ以下であり、さらに好ましくは１．０μｍ以下であり、さらにより好ましくは１．０μｍ未満であり、特に好ましくは０．８μｍ以下であり、とりわけ好ましくは０．６μｍ以下である。電気光学結晶基板の厚みの上限がこのような範囲であれば、電気光学素子の高速および低電圧駆動性能を向上させることができる。また、電気光学結晶基板の厚みがこのような範囲であれば、高誘電率層を用いる効果が顕著なものとなる。すなわち、光の伝搬損失の低下を抑制しつつ、より高速およびより低電圧での駆動を実現することが可能となる。さらに、本発明の実施形態によれば、このような非常に薄い電気光学結晶基板を用いても過酷な高温環境下における不具合が抑制されるので、過酷な高温環境下においても優れた信頼性を維持し得る非常に薄型の電気光学素子を実現することができる。

[0020] 電気光学結晶基板１０を構成する材料としては、本発明の実施形態による

効果が得られる限りにおいて任意の適切な材料が用いられ得る。そのような材料としては、代表的には、誘電体（例えば、セラミック）が挙げられる。具体例としては、ニオブ酸リチウム（$LiNbO_3$：ＬＮ）、タンタル酸リチウム（$LiTaO_3$：ＬＴ）、チタン酸リン酸カリウム（$KTiOPO_4$：ＫＴＰ）、ニオブ酸カリウム・リチウム（$K_xLi_{(1-x)}NbO_2$：ＫＬＭ）、ニオブ酸カリウム（$KNbO_3$：ＫＮ）、タンタル酸・ニオブ酸カリウム（$KNb_xTa_{(1-x)}O_3$：ＫＴＮ）、ニオブ酸リチウムとタンタル酸リチウムとの固溶体が挙げられる。

[0021] Ｃ．支持基板

支持基板３０は、複合基板内に位置する上面と、外部に露出する下面と、を有する。支持基板３０は、複合基板の強度を高めるために設けられており、これにより、電気光学結晶基板の厚みを薄くすることができる。支持基板３０としては、任意の適切な構成が採用され得る。支持基板を構成する材料の具体例としては、シリコン（Ｓｉ）、ガラス、サイアロン（Si_3N_4－Al_2O_3）、ムライト（$3Al_2O_3\cdot 2SiO_2$，$2Al_2O_3\cdot 3SiO_2$）、窒化アルミニウム（ＡｌＮ）、窒化シリコン（Si_3N_4）、酸化マグネシウム（ＭｇＯ）、サファイア、石英、水晶、窒化ガリウム（ＧａＮ）、炭化シリコン（ＳｉＣ）、酸化ガリウム（Ga_2O_3）が挙げられる。１つの実施形態においては、支持基板３０は、上記のとおり酸化シリコンを主成分として含む。すなわち、支持基板は、例えばガラスで構成され得る。なお、支持基板３０を構成する材料の線膨張係数は、電気光学結晶基板１０を構成する材料の線膨張係数に近いほど好ましい。このような構成であれば、複合基板の熱変形（代表的には、反り）を抑制することができる。好ましくは、支持基板３０を構成する材料の線膨張係数は、電気光学結晶基板１０を構成する材料の線膨張係数に対して５０％～１５０％の範囲内である。この観点から、支持基板３０の構成材料は電気光学結晶基板１０と同じであってもよく、特にＬＮまたはＬＴを使用する場合には、その焦電性を抑えた基板を使用することができる。

[0022] 支持基板の厚みとしては、複合基板の補強効果を有する限りにおいて任意の適切な厚みが採用され得る。支持基板の厚みは、例えば１００μｍ～１０００μｍである。支持基板の厚みが薄すぎると、補強効果および取り扱い性が不十分となる場合がある。支持基板の厚みが厚すぎると、以下のような問題が発生する場合がある：（１）基板厚みが大きくなり従来プロセスで流動が困難となる、（２）得られる電気光学素子が厚くなりパッケージサイズが従来よりも大きくなってしまう、（３）支持基板の放熱性が不十分となる、（４）低周波数域でリップルが発生しやすくなる。

[0023] 上記のとおり、支持基板３０には低誘電率層５０が形成されていてもよい。低誘電率層を設けることにより、支持基板に関わらず低誘電率のみで速度整合条件を満足させることができる。また、第２の高誘電率層２２と支持基板３０の双方への原子の移動がなく界面の誘電率の差（結果として、屈折率の差）を大きくすることができる。その結果、高誘電率層の厚みを厚くすることなく、設計通りで製造時のばらつきや環境による経時変化の小さい電気光学素子を提供することができる。さらに、低誘電率層を設けることにより、支持基板の材料の選択肢を拡げることができる。低誘電率層としては、このような効果を有する限りにおいて任意の適切な構成が採用され得る。低誘電率層５０を構成する材料の具体例としては、酸化シリコン（SiO_2）、酸化アルミニウム（Al_2O_3）、フッ化マグネシウム（MgF_2）、フッ化カルシウム（CaF_2）が挙げられる。なお、上記のとおり、低誘電率層が酸化シリコンを主成分として含み、かつ、低誘電率層におけるアルゴン濃度が１．０原子％以下となるよう構成してもよい。

[0024] 低誘電率層の厚みとしては、任意の適切な厚みが採用され得る。低誘電率層の厚みは、例えば０．６μｍ～２０μｍであってもよく、また例えば５μｍ～１５μｍであってもよく、また例えば１０μｍを超えて２０μｍ以下であってもよく、また例えば１２μｍ～２０μｍであってもよく、また例えば１２μｍ～１５μｍであってもよい。低誘電率層の厚みがこのような範囲であれば、支持基板に関わらず、あるいは、低誘電率層を主にして速度整合条

件を満足させることができるという利点がある。低誘電率層が分厚い場合（例えば、厚みが１０μｍを超える場合）、低誘電率層のアルゴン濃度を制御することによる効果が顕著なものとなり得る。すなわち、低誘電率層のアルゴン濃度を上記所望の範囲とすることにより、低誘電率層が分厚くなっても低誘電率層中のアルゴンの総量が過度に大きくなることを防止することができる。その結果、低誘電率層が分厚くなっても高誘電率層のアルゴン濃度を所定値以下に制御することができ、過酷な高温環境下においても電気光学結晶基板のはがれを顕著に抑制することができる。

[0025] Ｄ．高誘電率層

第１の高誘電率層２１および第２の高誘電率層２２は、それぞれが同一の構成（実質的には、構成材料、厚み）であってもよく、互いが異なる構成であってもよい。好ましくは、第１の高誘電率層２１および第２の高誘電率層２２は、それぞれが同一材料で構成され得る。互いに異なる構成材料の第１の高誘電率層２１と第２の高誘電率層２２とを直接接合した場合、接合界面に形成されたアモルファス層を介して第１の高誘電率層および第２の高誘電率層を構成する材料（実質的には、原子）が互いに拡散・移行し得る。その結果、第１の高誘電率層および第２の高誘電率層のアモルファス層近傍部分は、それ以外の部分と異なる組成となり得る。その結果、予期せぬ導電率上昇および／または過度な応力の発生を引き起こす可能性がある。第１の高誘電率層および第２の高誘電率層を同一材料で構成することにより、このような不具合を防止することができる。

[0026] 高誘電率層としては、マイクロ波実効誘電率（屈折率）の過剰な低下を抑制して高速および低電圧駆動を実現するという効果を有する限りにおいて、任意の適切な構成が採用され得る。高誘電率層を構成する材料の具体例としては、酸化タンタル（Ta_2O_5）、酸化ニオブ（Nb_2O_5）、酸化チタン（TiO_2）、酸化アルミニウム、酸化ハフニウム、シリコン（例えば、アモルファスシリコン）が挙げられる。

[0027] 第１の高誘電率層の厚み、第２の高誘電率層の厚み、ならびに、第１の高

誘電率層および第２の高誘電率層の合計厚みについては、上記Ａ項で説明したとおりである。

[0028] 高誘電率層におけるアルゴン濃度はそれぞれ、例えば１．０原子％～１０原子％であってもよく、また例えば１．０原子％～８．０原子％であってもよく、また例えば１．０原子％～６．０原子％であってもよく、また例えば１．０原子％～５．０原子％であってもよく、また例えば２．０原子％～１０原子％であってもよく、また例えば４．０原子％～１０原子％であってもよく、また例えば５．０原子％～１０原子％であってもよい。高誘電率層のアルゴン濃度がこのような範囲であれば、電気光学結晶基板を非常に薄く（例えば、１μｍ未満と）した場合であっても、過酷な高温環境下における電気光学結晶基板のはがれを顕著に抑制することができる。その結果、過酷な高温環境下においても優れた信頼性を維持し得る非常に薄型の電気光学素子を実現することができる。上記のとおり、高誘電率層のこのようなアルゴン濃度は、支持基板または低誘電率層（存在する場合）が酸化シリコンを主成分として含むように構成し、かつ、支持基板または低誘電率層におけるアルゴン濃度を１．０原子％以下とすることにより実現され得る。

[0029] Ｅ．アモルファス層

アモルファス層４０は、第１の高誘電率層２１と第２の高誘電率層２２との直接接合により接合界面に形成された層である。アモルファス層４０は名称のとおりアモルファス構造を有しており、第１の高誘電率層２１を構成する元素と第２の高誘電率層２２を構成する元素とで構成されている。アモルファス層は、代表的には、直接接合に用いられる中性原子ビームを構成する原子種（代表的には、アルゴン、窒素）をさらに含み得る。アモルファス層におけるこのような原子種の含有量は、例えば１．５原子％～２．５原子％であり得る。

[0030] アモルファス層の厚みは、例えば０．１ｎｍ～１００ｎｍ、また例えば２ｎｍ～１５ｎｍであり得る。

[0031] アモルファス層４０は、第１の高誘電率層２１と第２の高誘電率層２２と

の直接接合においてこれらの層の構成材料の原子が拡散することにより形成される。したがって、アモルファス層の上面（第１の高誘電率層２１との界面）および下面（第２の高誘電率層２２との界面）は、必ずしも平坦ではない。アモルファス層の上面および下面の算術平均粗さは、例えば０．１ｎｍ～１０ｎｍであり得る。さらに、このような形成過程に起因して、アモルファス層の上部および下部は、それぞれが異なる組成を有する場合がある。このようなアモルファス層が電気光学基板または支持基板と高誘電率層との界面に形成される場合には、上記のとおり、アモルファス層自体が電気光学結晶基板に悪影響を与え、あるいは、アモルファス層を介して支持基板の構成材料が拡散することにより高誘電率層に悪影響を与える場合がある。本発明の実施形態によれば、第１の高誘電率層２１と第２の高誘電率層２２とを直接接合することにより、アモルファス層を電気光学結晶基板および支持基板のいずれからも隔離して形成することができるので、このような不具合を防止することができる。

実施例

[0032] 以下、実施例によって本発明を具体的に説明するが、本発明はこれら実施例によって限定されるものではない。

[0033] ＜実施例１＞

電気光学結晶基板として直径４インチのＸカットニオブ酸リチウム基板、支持基板として直径４インチのシリコン基板（厚み５００μｍ）を用意した。まず、電気光学結晶基板上に酸化タンタルをスパッタリングして、厚み０．０３μｍの第１の高誘電率層を形成した。次いで、支持基板上に酸化シリコンをスパッタリングして、厚み１０．０μｍの低誘電率層を形成した。得られた低誘電率層をわずかにＣＭＰ研磨して、低誘電率層表面の算術平均粗さＲａを小さくした。次いで、低誘電率層表面を洗浄し、当該洗浄表面に酸化タンタルをスパッタリングして、厚み０．０３μｍの第２の高誘電率層を形成した。ここで、原子間力顕微鏡を用いて、第２の高誘電率層と低誘電率層との界面の□１０μｍ算術平均粗さ、および、低誘電率層と支持基板との

界面の算術平均粗さを測定したところ、いずれも□１０μｍで０．２ｎｍであった。次に、第１の高誘電率層および第２の高誘電率層の表面を洗浄した後、第１の高誘電率層と第２の高誘電率層とを直接接合することにより電気光学結晶基板と支持基板とを一体化した。直接接合は、以下のようにして行った。電気光学結晶基板および支持基板を真空チャンバーに投入し、10^{-6}Ｐａ台の真空中で、電気光学結晶基板および支持基板の接合面（第１の高誘電率層および第２の高誘電率層の表面）に高速Ａｒ中性原子ビーム（加速電圧１ｋＶ、Ａｒ流量６０ｓｃｃｍ）を７０ｓｅｃ間照射した。照射後、１０分間放置して電気光学結晶基板および支持基板を放冷したのち、電気光学結晶基板および支持基板の接合面（第１の高誘電率層および第２の高誘電率層のビーム照射面）を接触させ、４．９０ｋＮで２分間加圧して電気光学結晶基板と支持基板とを接合した。接合後、電気光学結晶基板の厚みが０．５μｍになるまで研磨加工し、図２の電気光学素子用複合基板を得た。得られた電気光学素子用複合基板においては、接合界面にはがれ等の不良は観察されなかった。

[0034] 上記で得られた複合基板を用いて、光導波路（リッジ型導波路）および電極を形成して光変調器を作製した。電極間のギャップを３μｍ、電極長Ｌを１ｃｍとした場合、半波長電圧Ｖπと電極長Ｌの積Ｖπ・Ｌは１．０Ｖｃｍであった。光導波路の伝搬損失は０．５ｄＢであった。さらに、光コンポーネントアナライザにて光変調器の変調帯域を測定した結果、変調帯域は５０ＧＨｚであり、この周波数以下において変調特性にリップルは検出されなかった。

[0035] ＜実施例２＞

支持基板として石英ガラス基板（厚み５００μｍ）を用いたこと、および、支持基板に低誘電率層を形成しなかったこと以外は実施例１と同様にして、図２に類似した電気光学素子用複合基板（ただし、第２の高誘電率層と支持基板との間に低誘電率層なし）を得た。得られた電気光学素子用複合基板においては、接合界面にはがれ等の不良は観察されなかった。

さらに、得られた複合基板から光変調器を作製した。半波長電圧Ｖπと電極長Ｌの積Ｖπ・Ｌは１．０Ｖｃｍであった。光導波路の伝搬損失は０．５ｄＢであった。さらに、変調帯域は５０ＧＨｚであり、この周波数以下において変調特性にリップルは検出されなかった。

[0036] ＜比較例１＞

電気光学結晶基板に第１の高誘電率層を形成しなかったこと（すなわち、電気光学結晶基板１０と第２の高誘電率層２２とを直接接合したこと）以外は実施例１と同様にして、図３の電気光学素子用複合基板を得た。得られた電気光学素子用複合基板においては、接合界面にはがれ等の不良は観察されなかった。

さらに、得られた複合基板から光変調器を作製した。半波長電圧Ｖπと電極長Ｌの積Ｖπ・Ｌは１．２Ｖｃｍであった。光導波路の伝搬損失は１．０ｄＢであった。さらに、変調帯域は５０ＧＨｚであり、この周波数以下において変調特性にリップルは検出されなかった。

半波長電圧が増加してしまった理由としては、接合界面に形成されたアモルファス層４０が電気光学結晶基板１０内に進展しまったため、この領域においてニオブ酸リチウム結晶の電気光学効果が低下したことが原因と考えられる。この領域に分布する光電界は電圧印加による屈折率変化が小さくなり、光導波路を伝搬する光の位相シフト量が低下し、その結果、光変調器の半波長電圧が増加したものと推察され得る。

また、光伝搬損失が増加した理由としては、接合界面に形成されたアモルファス層４０による吸収および／または散乱が原因と考えられる。アモルファス層は、ニオブ酸リチウムと酸化タンタルの混成層となっており、このアモルファス層内の組成のバラツキおよび／またはアモルファス層形成時の内部応力により光が吸収され、アモルファス層と電気光学結晶基板との界面において光が散乱したと推察され得る。

[0037] ＜比較例２＞

支持基板に第２の高誘電率層を形成しなかったこと（すなわち、第１の高

誘電率層２１と低誘電率層５０とを直接接合したこと）以外は実施例１と同様にして、図４の電気光学素子用複合基板を得た。得られた電気光学素子用複合基板においては、接合界面にはがれの不良が発生した。はがれは、複合基板の全面積に対して約３０％の割合で発生していた。なお、上記と同様にして別の複合基板（ウェハ）の作製を試みたところ、全く接合できない場合もあった。

さらに、上記のはがれが約３０％の複合基板から光変調器を作製した。半波長電圧Ｖπと電極長Ｌの積Ｖπ・Ｌは１．０Ｖｃｍであった。光導波路の伝搬損失は０．５ｄＢであった。さらに、変調帯域は４０ＧＨｚであり、この周波数以下において変調特性にリップルは検出されなかった。

変調帯域が低下した理由としては、第１の高誘電率層２１の誘電率が低下したことが原因と考えられる。直接接合時に第１の高誘電率層２１と低誘電率層５０との界面にアモルファス層４０が形成されることにより、第１の高誘電率層のある部分は酸化シリコンの拡散によって誘電率が低下してしまい、電気信号の実効誘電率および実効屈折率の低下を抑制できず、速度整合条件からのずれによって変調帯域が低下したと推察され得る。

[0038] ＜実施例３～１６および比較例３～１２＞

表１に示す構成で電気光学素子用複合基板を作製し、接合界面のはがれ等の不良の有無を観察した。さらに、得られた複合基板から光変調器を作製し、実施例１と同様の評価に供した。結果を表１に示す。

[0039]

[表1]

	構造	電気光学結晶基板	第1の高誘電率層	第2の高誘電率層	低誘電率層	支持基板	接合部剥がれ	VπL (Vcm)	光伝搬損失 (dB)	変調帯域 (GHz)
実施例1	図2	Xカット LiNbO3	Ta2O5	Ta2O5	SiO2	Si	なし	1.0	0.5	50
実施例2	図2	Xカット LiNbO3	Ta2O5	Ta2O5	なし	ガラス	なし	1.0	0.5	50
比較例1	図3	Xカット LiNbO3	なし	Ta2O5	SiO2	Si	なし	1.2	1.0	50
比較例2	図4	Xカット LiNbO3	Ta2O5	なし	SiO2	Si	あり	1.0	0.5	40
実施例3	図2	Xカット LiTaO3	Ta2O5	Ta2O5	SiO2	Si	なし	1.2	0.5	50
実施例4	図2	Xカット LiTaO3	Ta2O5	Ta2O5	なし	ガラス	なし	1.2	0.5	50
比較例3	図3	Xカット LiTaO3	なし	Ta2O5	SiO2	Si	なし	1.4	1.0	50
比較例4	図4	Xカット LiTaO3	Ta2O5	なし	SiO2	Si	あり	1.2	0.5	40
実施例5	図2	Xカット LiNbO3	Nb2O5	Nb2O5	SiO2	Si	なし	1.0	0.5	50
実施例6	図2	Xカット LiNbO3	Nb2O5	Nb2O5	なし	ガラス	なし	1.0	0.5	50
比較例5	図3	Xカット LiNbO3	なし	Nb2O5	SiO2	Si	なし	1.2	1.0	50
比較例6	図4	Xカット LiNbO3	Nb2O5	なし	SiO2	Si	あり	1.0	0.5	40
実施例7	図2	Xカット LiNbO3	アモルファスSi	アモルファスSi	SiO2	Si	なし	1.0	0.5	55
実施例8	図2	Xカット LiNbO3	アモルファスSi	アモルファスSi	なし	ガラス	なし	1.0	0.5	55
比較例7	図3	Xカット LiNbO3	なし	アモルファスSi	SiO2	Si	なし	1.2	1.0	55
比較例8	図4	Xカット LiNbO3	アモルファスSi	なし	SiO2	Si	あり	1.0	0.5	45
実施例9	図2	Xカット LiNbO3	Al2O3	Al2O3	SiO2	Si	なし	1.0	0.5	47
実施例10	図2	Xカット LiNbO3	Al2O3	Al2O3	なし	ガラス	なし	1.0	0.5	47
比較例9	図3	Xカット LiNbO3	なし	Al2O3	SiO2	Si	なし	1.2	1.0	47
比較例10	図4	Xカット LiNbO3	Al2O3	なし	SiO2	Si	あり	1.0	0.5	37
実施例11	図2	Xカット LiNbO3	Ta2O5	Ta2O5	なし	水晶	なし	1.0	0.5	50
実施例12	図2	Xカット LiNbO3	Ta2O5	Ta2O5	なし	サファイア	なし	1.0	0.5	48
実施例13	図2	Xカット LiNbO3	Ta2O5	Ta2O5	SiO2	Xカット LiNbO3	なし	1.0	0.5	50
実施例14	図2	Xカット LiNbO3	Ta2O5	Ta2O5	SiO2	窒化アルミニウム	なし	1.0	0.5	50
実施例15	図2	Zカット LiNbO3	Ta2O5	Ta2O5	SiO2	Si	なし	1.5	0.5	50
実施例16	図2	Zカット LiNbO3	Ta2O5	Ta2O5	なし	ガラス	なし	1.5	0.5	50
比較例11	図3	Zカット LiNbO3	なし	Ta2O5	SiO2	Si	なし	1.7	1.0	50
比較例12	図4	Zカット LiNbO3	Ta2O5	なし	SiO2	Si	あり	1.5	0.5	40

[0040] 表１から明らかなように、本発明の実施例によれば、２つの高誘電率層（第１の高誘電率層および第２の高誘電率層）を直接接合して電気光学結晶基

板と支持基板とを一体化することにより、はがれが抑制された電気光学素子用複合基板を得ることができる。さらに、本発明の実施例の電気光学素子用複合基板は、光の伝搬損失が小さく、かつ、高速および低電圧駆動が可能な電気光学素子（例えば、光変調器）を実現できることがわかる。

[0041] さらに、実施例７の電気光学素子用複合基板について、第１の高誘電率層と第２の高誘電率層との接合界面を透過型電子顕微鏡（ＴＥＭ）で観察した。ＴＥＭ画像（倍率：２００万倍）を図５に示す。図５から明らかなように、第１の高誘電率層と第２の高誘電率層との接合界面にはアモルファス層が形成されていることを確認した。併せて、第１の高誘電率層とアモルファス層との界面近傍、アモルファス層、および、アモルファス層と第２の高誘電率層との界面近傍の組成をＥＤＸ（エネルギー分散型Ｘ線分析）により調べた。結果を表２に示す。表２から明らかなように、アモルファス層およびその近傍には、直接接合に用いられる中性原子ビームを構成するアルゴンが含まれていた。アモルファス層近傍の酸素は、成膜装置の治具の吸着水分からでたものや成膜後の酸化によって検出される。必要に応じて、光学特性、電気特性や接合強度の観点から意図的に酸素をドープしてもよい。

[0042] [表2]

	組成単位（原子%）		
	Ｓｉ	Ｏ	Ａｒ
第１の高誘電率層とアモルファス層との界面近傍	９２．２	７．４	０．５
アモルファス層	８９．８	８．１	２．１
アモルファス層と第２の高誘電率層との界面近傍	９４．５	４．９	０．６

[0043] ＜実施例１７＞

電気光学結晶基板として直径４インチのＸカットニオブ酸リチウム基板、支持基板として直径４インチのガラス基板（厚み５００μｍ）を用意した。支持基板（ガラス基板）はゾル－ゲル法により形成して高純度化した。ガラス基板のアルゴンイオン濃度を、エネルギー分散型Ｘ線分析を用いて測定し

たところ１原子％であった。これらを用いて複合基板を作製した。具体的には以下のとおりであった。まず、電気光学結晶基板およびガラス基板のそれぞれに酸化タンタルをスパッタリングして、それぞれ厚み０．０３μｍの第１の高誘電率層および第２の高誘電率層を形成した。形成された第１の高誘電率層および第２の高誘電率層のアルゴン濃度をそれぞれエネルギー分散型Ｘ線分析にて測定した結果、１原子％であった。ここで、原子間力顕微鏡を用いて、第１の高誘電率層と電気光学結晶基板との界面の□１０μｍ算術平均粗さ、および、第２の高誘電率層と支持基板との界面の算術平均粗さを測定したところ、いずれも□１０μｍで０．２ｎｍであった。さらに、第１の高誘電率層および第２の高誘電率層の表面の算術平均粗さを測定したところ、いずれも□１０μｍで０．２ｎｍであった。次に、第１の高誘電率層および第２の高誘電率層の表面を洗浄した後、第１の高誘電率層と第２の高誘電率層とを直接接合することにより電気光学結晶基板と支持基板とを一体化した。直接接合は、以下のようにして行った。電気光学結晶基板および支持基板を真空チャンバーに投入し、10^{-6}Ｐａ台の真空中で、電気光学結晶基板および支持基板の接合面（第１の高誘電率層および第２の高誘電率層の表面）に高速Ａｒ中性原子ビーム（加速電圧１ｋＶ、Ａｒ流量６０ｓｃｃｍ）を７０ｓｅｃ間照射した。照射後、１０分間放置して電気光学結晶基板および支持基板を放冷したのち、電気光学結晶基板および支持基板の接合面（第１の高誘電率層および第２の高誘電率層のビーム照射面）を接触させ、４．９０ｋＮで２分間加圧して電気光学結晶基板と支持基板とを接合した。接合後、電気光学結晶基板の厚みが０．６μｍになるまで研磨加工し、電気光学結晶基板／第１の高誘電率層／アモルファス層／第２の高誘電率層／支持基板の構成を有する（すなわち、図２の構成から低誘電率層を除いた構成の）電気光学素子用複合基板を得た。得られた電気光学素子用複合基板においては、接合界面にはがれ等の不良は観察されなかった。

[0044] 上記で得られた複合基板を用いて、光導波路（リッジ型導波路）および電極を形成して光変調器を作製した。電極間のギャップを３μｍ、電極長Ｌを

１ｃｍとした場合、半波長電圧Ｖπと電極長Ｌの積Ｖπ・Ｌは１．０Ｖｃｍであった。光導波路の伝搬損失は０．５ｄＢであった。さらに、光コンポーネントアナライザにて光変調器の変調帯域を測定した結果、変調帯域は５０ＧＨｚであり、この周波数以下において変調特性にリップルは検出されなかった。

[0045] さらに、上記光変調器を信頼性試験（８０℃、５００時間の高温保持試験）に供し、上記と同様の評価を行った。その結果、半波長電圧Ｖπ、光導波路の伝搬損失、変調帯域の測定値の変化はなく、外観検査において電気光学結晶基板のはがれも認められなかった。このように、本実施例の光変調器は、過酷な高温環境下に起きて非常に優れた信頼性を示した。これらの結果をまとめて表３に示す。

[0046] ＜比較例１７ａ＞

支持基板としてアルゴン含有ガラス基板を用いた。このガラス基板のアルゴンイオン濃度をエネルギー分散型Ｘ線分析にて測定したところ、２原子％であった。この支持基板をもちいたこと以外は実施例１７と同様にして電気光学素子用複合基板を得た。ここで、第１の高誘電率層および第２の高誘電率層のアルゴン濃度をエネルギー分散型Ｘ線分析にて測定した結果、１１原子％であった。得られた電気光学素子用複合基板においては、接合界面にはがれ等の不良は観察されなかった。さらに、得られた複合基板から、実施例１７と同様にして光変調器を作製した。得られた光変調器の半波長電圧Ｖπと電極長Ｌの積Ｖπ・Ｌは１．０Ｖｃｍであり、光導波路の伝搬損失は０．５ｄＢであった。また、光変調器の変調帯域は５０ＧＨｚであり、この周波数以下において変調特性にリップルは検出されなかった。さらに、光変調器を実施例１７と同様の信頼性試験に供した。その結果、電気光学結晶基板のはがれが発生し、特性評価を行うことができなかった。これらの結果をまとめて表３に示す。なお、比較を容易にするために、表３に示される比較例および参考例の番号については、実施例の番号に対応させている。

[0047] ＜実施例１８～２１、比較例１７ｂ～２１ｂ、参考例１７ａ～２１ｂ＞

表３に示す構成で電気光学素子用複合基板を作製し、接合界面のはがれ等の不良の有無を観察した。さらに、得られた複合基板から光変調器を作製し、実施例１と同様の評価に供した。加えて、光変調器を実施例１７と同様の信頼性試験に供した。結果を表３に示す。

[0048]

[表3]

	電気光学結晶基板	電気光学結晶基板厚み(μm)	第1の高誘電率膜	第2の高誘電率膜	第1、第2高誘電率膜中のAr濃度(原子%)	支持基板	支持基板中のAr濃度(原子%)	接合強制ずれ	Vπ L (Vcm)	光伝搬損失(dB)	変調帯域(GHz)	信頼性試験後の電気光学付加基板剥離
実施例17	Xカット LiNbO3	0.6	Ta2O5	Ta2O5	1	ガラス	1	なし	1.0	0.5	50	無
比較例17a	〃	〃	〃	〃	11	アルゴン含有ガラス	2	〃	〃	〃	〃	有
比較例17b	〃	〃	〃	〃	11	サファイア	1	〃	〃	〃	43	有
参考例17a	〃	1.0	〃	〃	1	ガラス	1	〃	〃	〃	50	無
参考例17b	〃	〃	〃	〃	11	サファイア	1	〃	〃	〃	43	無
実施例18	Xカット LiNbO3	0.6	Nb2O5	Nb2O5	10	ガラス	1	なし	1.0	0.5	50	無
比較例18a	〃	〃	〃	〃	11	アルゴン含有ガラス	2	〃	〃	〃	〃	有
比較例18b	〃	〃	〃	〃	11	サファイア	1	〃	〃	〃	43	有
参考例18a	〃	1.0	〃	〃	10	ガラス	1	〃	〃	〃	50	無
参考例18b	〃	〃	〃	〃	11	サファイア	1	〃	〃	〃	43	無
実施例19	Xカット LiNbO3	0.6	アモルファスSi	アモルファスSi	5	ガラス	1	なし	1.0	0.5	55	無
比較例19a	〃	〃	〃	〃	11	アルゴン含有ガラス	2	〃	〃	〃	〃	有
比較例19b	〃	〃	〃	〃	11	サファイア	1	〃	〃	〃	43	有
参考例19a	〃	1.0	〃	〃	5	ガラス	1	〃	〃	〃	55	無
参考例19b	〃	〃	〃	〃	11	サファイア	1	〃	〃	〃	45	無
実施例20	Xカット LiNbO3	0.6	Al2O3	Al2O3	5	ガラス	1	なし	1.0	0.5	47	無
比較例20a	〃	〃	〃	〃	11	アルゴン含有ガラス	2	〃	〃	〃	〃	有
比較例20b	〃	〃	〃	〃	11	サファイア	1	〃	〃	〃	45	有
参考例20a	〃	1.0	〃	〃	5	ガラス	1	〃	〃	〃	50	無
参考例20b	〃	〃	〃	〃	11	サファイア	1	〃	〃	〃	45	無
実施例21	Zカット LiNbO3	0.6	Ta2O5	Ta2O5	5	ガラス	1	なし	1.5	0.5	50	無
比較例21a	〃	〃	〃	〃	11	アルゴン含有ガラス	2	〃	〃	〃	〃	有
比較例21b	〃	〃	〃	〃	11	サファイア	1	〃	〃	〃	43	有
参考例21a	〃	1.0	〃	〃	5	ガラス	1	〃	〃	〃	50	無
参考例21b	〃	〃	〃	〃	11	サファイア	1	〃	〃	〃	43	無

[0049] 表３から明らかなように、本発明の実施例によれば、支持基板を、酸化シリコンを主成分として構成し、かつ、支持基板におけるアルゴン濃度を１．

０原子％以下とすることにより、過酷な高温環境下においても優れた信頼性を維持し得る非常に薄型の電気光学素子を実現することができる。さらに、参考例から明らかなように、このような効果は、電気光学結晶基板を１μｍ未満まで薄くした場合に特有の効果であることがわかる。

[0050] ＜実施例２２＞

電気光学結晶基板として直径４インチのＸカットニオブ酸リチウム基板、支持基板として直径４インチのシリコン基板（厚み５００μｍ）を用意した。まず、電気光学結晶基板上に酸化タンタルをスパッタリングして、厚み０．０３μｍの第１の高誘電率層を形成した。次いで、支持基板上に酸化シリコンをスパッタリングして、厚み１２．０μｍの低誘電率層を形成した。得られた低誘電率層をわずかにＣＭＰ研磨して、低誘電率層表面の算術平均粗さＲａを小さくした。次いで、低誘電率層表面を洗浄し、当該洗浄表面に酸化タンタルをスパッタリングして、厚み０．０３μｍの第２の高誘電率層を形成した。ここで、低誘電率層のアルゴンイオン濃度を、エネルギー分散型Ｘ線分析を用いて測定したところ１原子％であった。なお、低誘電率層におけるアルゴン濃度はスパッタリング中のアルゴン分圧を変更することで制御した。また、第１の高誘電率層および第２の高誘電率層のアルゴン濃度をそれぞれエネルギー分散型Ｘ線分析にて測定した結果、１原子％であった。さらに、原子間力顕微鏡を用いて、第１の高誘電率層と電気光学結晶基板との界面の□１０μｍ算術平均粗さ、および、第２の高誘電率層と支持基板との界面の算術平均粗さを測定したところ、いずれも□１０μｍで０．２ｎｍであった。さらに、第１の高誘電率層および第２の高誘電率層の表面の算術平均粗さを測定したところ、いずれも□１０μｍで０．２ｎｍであった。次に、第１の高誘電率層および第２の高誘電率層の表面を洗浄した後、第１の高誘電率層と第２の高誘電率層とを直接接合することにより電気光学結晶基板と支持基板とを一体化した。直接接合は、以下のようにして行った。電気光学結晶基板および支持基板を真空チャンバーに投入し、10^{-6}Ｐａ台の真空中で、電気光学結晶基板および支持基板の接合面（第１の高誘電率層および

第２の高誘電率層の表面）に高速Ａｒ中性原子ビーム（加速電圧１ｋＶ、Ａｒ流量６０ｓｃｃｍ）を７０ｓｅｃ間照射した。照射後、１０分間放置して電気光学結晶基板および支持基板を放冷したのち、電気光学結晶基板および支持基板の接合面（第１の高誘電率層および第２の高誘電率層のビーム照射面）を接触させ、４．９０ｋＮで２分間加圧して電気光学結晶基板と支持基板とを接合した。接合後、電気光学結晶基板の厚みが０．６μｍになるまで研磨加工し、図２に示す構成を有する電気光学素子用複合基板を得た。得られた電気光学素子用複合基板においては、接合界面にはがれ等の不良は観察されなかった。

[0051] 上記で得られた複合基板を用いて、光導波路（リッジ型導波路）および電極を形成して光変調器を作製した。電極間のギャップを３μｍ、電極長Ｌを１ｃｍとした場合、半波長電圧Ｖπと電極長Ｌの積Ｖπ・Ｌは１．０Ｖｃｍであった。光導波路の伝搬損失は０．５ｄＢであった。さらに、光コンポーネントアナライザにて光変調器の変調帯域を測定した結果、変調帯域は５０ＧＨｚであり、この周波数以下において変調特性にリップルは検出されなかった。

[0052] さらに、上記光変調器を信頼性試験（８０℃、５００時間の高温保持試験）に供し、上記と同様の評価を行った。その結果、半波長電圧Ｖπ、光導波路の伝搬損失、変調帯域の測定値の変化はなく、外観検査において電気光学結晶基板のはがれも認められなかった。このように、本実施例の光変調器は、過酷な高温環境下に起きて非常に優れた信頼性を示した。これらの結果をまとめて表４に示す。

[0053] ＜比較例２２＞

低誘電率層としてアルゴン濃度が２原子％の酸化シリコン層（厚み１２．０μｍ）を形成したこと以外は実施例２２と同様にして電気光学素子用複合基板を得た。低誘電率層におけるアルゴン濃度はスパッタリング中のアルゴン分圧を変更することで制御した。ここで、第１の高誘電率層および第２の高誘電率層のアルゴン濃度をエネルギー分散型Ｘ線分析にて測定した結果、

１１原子％であった。得られた電気光学素子用複合基板においては、接合界面にはがれ等の不良は観察されなかった。さらに、得られた複合基板から、実施例２２と同様にして光変調器を作製した。得られた光変調器の半波長電圧Ｖπと電極長Ｌの積Ｖπ・Ｌは１．０Ｖｃｍであり、光導波路の伝搬損失は０．５ｄＢであった。また、光変調器の変調帯域は５０ＧＨｚであり、この周波数以下において変調特性にリップルは検出されなかった。さらに、光変調器を実施例２２と同様の信頼性試験に供した。その結果、電気光学結晶基板のはがれが発生し、特性評価を行うことができなかった。これらの結果をまとめて表４に示す。なお、比較を容易にするために、表４に示される比較例および参考例の番号については、実施例の番号に対応させている。

[0054] ＜実施例２３～２６、比較例２３～２６、参考例２２～２６＞

表４に示す構成で電気光学素子用複合基板を作製し、接合界面のはがれ等の不良の有無を観察した。さらに、得られた複合基板から光変調器を作製し、実施例１と同様の評価に供した。加えて、光変調器を実施例２２と同様の信頼性試験に供した。結果を表４に示す。

[0055]

[表4]

	電気光学単結晶基板	電気光学結晶基板厚み(μm)	第1の高誘電率層	第2の高誘電率層	第1,第2高誘電率層中のAr濃度(原子%)	低誘電率層	低誘電率層中のAr濃度(原子%)	接合部剥がれ	$V_{\pi}L$ (Vcm)	光伝搬損失(dB)	変調帯域(GHz)	信頼性試験後の電気光学結晶基板割れ
実施例22	Xカット LiNbO3	0.6	Ta_2O_5	Ta_2O_5	1	酸化シリコン	1	なし	1.0	0.5	50	無
比較例22	〃	1	〃	〃	11	アルゴン含有酸化シリコン	2	〃	〃	1	〃	有
参考例22	〃	1.0	〃	〃	11	アルゴン含有酸化シリコン	2	〃	〃	1	〃	無
実施例23	Xカット LiNbO3	0.6	Nb_2O_5	Nb_2O_5	10	酸化シリコン	1	なし	1.0	0.5	50	無
比較例23	〃	1	〃	〃	11	アルゴン含有酸化シリコン	2	〃	〃	1	〃	有
参考例23	〃	1.0	〃	〃	11	アルゴン含有酸化シリコン	2	〃	〃	1	〃	無
実施例24	Xカット LiNbO3	0.6	アモルファスSi	アモルファスSi	5	酸化シリコン	1	なし	1.0	0.5	55	無
比較例24	〃	1	〃	〃	11	アルゴン含有酸化シリコン	2	〃	〃	1	〃	有
参考例24	〃	1.0	〃	〃	11	アルゴン含有酸化シリコン	2	〃	〃	1	〃	無
実施例25	Xカット LiNbO3	0.6	Al_2O_3	Al_2O_3	5	酸化シリコン	1	なし	1.0	0.5	47	無
比較例25	〃	1	〃	〃	11	アルゴン含有酸化シリコン	2	〃	〃	1	〃	有
参考例25	〃	1.0	〃	〃	11	アルゴン含有酸化シリコン	2	〃	〃	1	〃	無
実施例26	Zカット LiNbO3	0.6	Ta_2O_5	Ta_2O_5	5	酸化シリコン	1	なし	1.5	0.5	50	無
比較例26	〃	1	〃	〃	11	アルゴン含有酸化シリコン	2	〃	〃	1	〃	有
参考例26	〃	1.0	〃	〃	11	アルゴン含有酸化シリコン	2	〃	〃	1	〃	無

[0056] 表４から明らかなように、本発明の実施例によれば、低誘電率層を、酸化シリコンを主成分として構成し、かつ、低誘電率層におけるアルゴン濃度を

１．０原子％以下とすることにより、過酷な高温環境下においても優れた信頼性を維持し得る非常に薄型の電気光学素子を実現することができる。さらに、参考例から明らかなように、このような効果は、電気光学結晶基板を１μｍ未満まで薄くした場合に特有の効果であることがわかる。

[0057] ＜実施例２７＞

電気光学結晶基板として直径４インチのＸカットニオブ酸リチウム基板、支持基板として直径４インチのシリコン基板（厚み５００μｍ）を用意した。まず、電気光学結晶基板上に酸化タンタルをスパッタリングして、厚み０．０１μｍの第１の高誘電率層を形成した。次いで、支持基板上に酸化シリコンをスパッタリングして、厚み１２．０μｍの低誘電率層を形成した。得られた低誘電率層をわずかにＣＭＰ研磨して、低誘電率層表面の算術平均粗さＲａを小さくした。次いで、低誘電率層表面を洗浄し、当該洗浄表面に酸化タンタルをスパッタリングして、厚み０．０３μｍの第２の高誘電率層を形成した。ここで、原子間力顕微鏡を用いて、第２の高誘電率層と低誘電率層との界面の□１０μｍ算術平均粗さ、および、低誘電率層と支持基板との界面の算術平均粗さを測定したところ、いずれも□１０μｍで０．２ｎｍであった。次に、第１の高誘電率層および第２の高誘電率層の表面を洗浄した後、第１の高誘電率層と第２の高誘電率層とを直接接合することにより電気光学結晶基板と支持基板とを一体化した。直接接合は、以下のようにして行った。電気光学結晶基板および支持基板を真空チャンバーに投入し、10^{-6}Ｐａ台の真空中で、電気光学結晶基板および支持基板の接合面（第１の高誘電率層および第２の高誘電率層の表面）に高速Ａｒ中性原子ビーム（加速電圧１ｋＶ、Ａｒ流量６０ｓｃｃｍ）を７０ｓｅｃ間照射した。照射後、１０分間放置して電気光学結晶基板および支持基板を放冷したのち、電気光学結晶基板および支持基板の接合面（第１の高誘電率層および第２の高誘電率層のビーム照射面）を接触させ、４．９０ｋＮで２分間加圧して電気光学結晶基板と支持基板とを接合した。接合後、電気光学結晶基板の厚みが０．６μｍになるまで研磨加工し、図２の構成を有する電気光学素子用複合基板を得

た。得られた電気光学素子用複合基板においては、接合界面にはがれ等の不良は観察されなかった。

[0058] 上記で得られた複合基板を用いて、光導波路（リッジ型導波路）および電極を形成して光変調器を作製した。電極間のギャップを３μｍ、電極長Ｌを１ｃｍとした場合、半波長電圧Ｖπと電極長Ｌの積Ｖπ・Ｌは１．０Ｖｃｍであった。光導波路の伝搬損失は０．５ｄＢであった。さらに、光コンポーネントアナライザにて光変調器の変調帯域を測定した結果、変調帯域は５０ＧＨｚであり、この周波数以下において変調特性にリップルは検出されなかった。

[0059] ＜実施例２８＞

第１の高誘電率層の厚みを０．０５μｍとしたこと以外は実施例２７と同様にして電気光学素子用複合基板を作製した。得られた電気光学素子用複合基板においては、接合界面にはがれ等の不良は観察されなかった。さらに、得られた複合基板から光変調器を作製し、実施例１と同様の評価に供した。結果を表５に示す。

[0060] ＜実施例２９＞

第１の高誘電率層の厚みを０．０７μｍとしたこと以外は実施例２７と同様にして電気光学素子用複合基板を作製した。得られた電気光学素子用複合基板においては、接合界面にはがれ等の不良は観察されなかった。さらに、得られた複合基板から光変調器を作製し、実施例１と同様の評価に供した。結果を表５に示す。

[0061] ＜比較例２７～２９および参考例２７～２８＞

表５に示す構成で電気光学素子用複合基板を作製した。得られた電気光学素子用複合基板においては、接合界面にはがれ等の不良は観察されなかった。さらに、得られた複合基板から光変調器を作製し、実施例１と同様の評価に供した。結果を表５に示す。

[0062] ＜実施例３０＞

支持基板としてガラス基板（厚み５００μｍ）を用いたこと、ならびに、

低誘電率層を形成せず、第２の高誘電率層を支持基板に直接形成したこと以外は実施例２７と同様にして、電気光学素子用複合基板を作製した。得られた電気光学素子用複合基板においては、接合界面にはがれ等の不良は観察されなかった。さらに、得られた複合基板から光変調器を作製し、実施例１と同様の評価に供した。結果を表５に示す。

[0063] ＜実施例３１～３２、比較例３０～３２および参考例２９～３０＞

表５に示す構成で電気光学素子用複合基板を作製した。得られた電気光学素子用複合基板においては、接合界面にはがれ等の不良は観察されなかった。さらに、得られた複合基板から光変調器を作製し、実施例１と同様の評価に供した。結果を表５に示す。

[0064] [表5]

	電気光学結晶基板	第1の高誘電率層	第2の高誘電率層	高誘電率層合計厚み	低誘電率層	支持基板	VπL（Vcm）	光伝搬損失（dB）	変調帯域（GHz）
実施例27	XカットLiNbO3 0.6μm	Ta2O5 0.01μm	Ta2O5 0.03μm	0.04μm	SiO2 12μm	Si	1	0.5	50
実施例28	↓	Ta2O5 0.05μm	↓	0.08μm	↓	↓	1	0.5	50
実施例29	↓	Ta2O5 0.07μm	↓	0.10μm	↓	↓	1	0.5	50
比較例27	↓	Ta2O5 0.08μm	↓	0.11μm	↓	↓	1	0.5	45
比較例28	↓	Ta2O5 0.005μm	↓	0.035μm	↓	↓	1.5	1	50
比較例29	↓	Ta2O5 0.005μm	Ta2O5 0.05μm	0.055μm	↓	↓	1.5	1	50
参考例27	XカットLiNbO3 1μm	Ta2O5 0.01μm	Ta2O5 0.03μm	0.04μm	↓	↓	1	0.5	50
参考例28	↓	Ta2O5 0.005μm	Ta2O5 0.03μm	0.035μm	↓	↓	1	0.5	50
実施例30	XカットLiNbO3 0.6μm	Ta2O5 0.01μm	Ta2O5 0.03μm	0.04μm	なし	ガラス	1	0.5	50
実施例31	↓	Ta2O5 0.05μm	↓	0.08μm	↓	↓	1	0.5	50
実施例32	↓	Ta2O5 0.07μm	↓	0.10μm	↓	↓	1	0.5	50
比較例30	↓	Ta2O5 0.08μm	↓	0.11μm	↓	↓	1	0.5	45
比較例31	↓	Ta2O5 0.005μm	↓	0.035μm	↓	↓	1.5	1	50
比較例32	↓	Ta2O5 0.005μm	Ta2O5 0.05μm	0.055μm	↓	↓	1.5	1	50
参考例29	XカットLiNbO3 1μm	Ta2O5 0.01μm	Ta2O5 0.03μm	0.04μm	↓	↓	1	0.5	50
参考例30	↓	Ta2O5 0.005μm	Ta2O5 0.03μm	0.035μm	↓	↓	1	0.5	50

[0065] 表５から明らかなように、本発明の実施例によれば、電気光学結晶基板を１μｍ未満（例えば、０．６μｍ）まで薄くしても、２つの高誘電率層を直接接合して電気光学結晶基板と支持基板とを一体化することによる優れた効果（代表的には、はがれの顕著な抑制、ならびに、電気光学素子とした場合の光の伝搬損失の抑制、かつ、高速および低電圧駆動の実現）を維持するこ

とができる。

さらに、実施例２７～３２、比較例２７～３２および参考例２７～３０に対応する構成について、第１の高誘電率層および第２の高誘電率層の形成材料をそれぞれAl_2O_3、Nb_2O_5またはアモルファスシリコンに変更しても、同様の結果が得られることを確認した。

産業上の利用可能性

[0066] 本発明の実施形態による複合基板は、電気光学素子（例えば、光変調器）に好適に用いられ得る。

符号の説明

[0067]

１０	電気光学結晶基板
２１	第１の高誘電率層
２２	第２の高誘電率層
３０	支持基板
４０	アモルファス層
５０	低誘電率層
１００	電気光学素子用複合基板

請求の範囲

[請求項1] 電気光学効果を有する電気光学結晶基板と、第１の高誘電率層と、第２の高誘電率層と、支持基板と、をこの順に有し、

該第１の高誘電率層と該第２の高誘電率層とが直接接合されており、該第１の高誘電率層と該第２の高誘電率層との接合界面にアモルファス層が形成されている、

電気光学素子用複合基板。

[請求項2] 請求項１に記載の電気光学素子用複合基板であって、

前記電気光学結晶基板に前記第１の高誘電率層が直接形成され、前記支持基板に前記第２の高誘電率層が直接形成されており、

該支持基板が酸化シリコンを主成分として含み、該支持基板におけるアルゴン濃度が１．０原子％以下である、

電気光学素子用複合基板。

[請求項3] 請求項１に記載の電気光学素子用複合基板であって、

前記電気光学結晶基板に前記第１の高誘電率層が直接形成され、前記支持基板に低誘電率層が直接形成され、該低誘電率層に前記第２の高誘電率層が直接形成されており、

該低誘電率層が酸化シリコンを主成分として含み、該低誘電率層におけるアルゴン濃度が１．０原子％以下である、

電気光学素子用複合基板。

[請求項4] 前記第１の高誘電率層および前記第２の高誘電率層におけるアルゴン濃度が、それぞれ１．０原子％～１０原子％である、請求項２または３に記載の電気光学素子用複合基板。

[請求項5] 請求項１に記載の電気光学素子用複合基板であって、

前記電気光学結晶基板に前記第１の高誘電率層が直接形成され、前記支持基板に低誘電率層が直接形成され、該低誘電率層に前記第２の高誘電率層が直接形成されており、

該低誘電率層が、酸化シリコン、酸化アルミニウム、フッ化マグネ

シウムおよびフッ化カルシウムから選択される１つで構成されている、

電気光学素子用複合基板。

[請求項6] 請求項１に記載の電気光学素子用複合基板であって、

前記電気光学結晶基板に前記第１の高誘電率層が直接形成され、前記支持基板に前記第２の高誘電率層が直接形成されており、

該電気光学結晶基板の厚みが０．１μｍ以上１．０μｍ未満であり、

該第１の高誘電率層の厚みが０．０１μｍ以上であり、

該第１の高誘電率層および該第２の高誘電率層の合計厚みが０．１０μｍ以下である、

電気光学素子用複合基板。

[請求項7] 前記支持基板に直接形成された低誘電率層をさらに有し、該低誘電率層に前記第２の高誘電率層が直接形成されている、請求項６に記載の電気光学素子用複合基板。

[請求項8] 前記支持基板が、シリコン、ガラス、サイアロン、ムライト、窒化アルミニウム、窒化シリコン、酸化マグネシウム、サファイア、石英、水晶、窒化ガリウム、炭化シリコンおよび酸化ガリウムから選択される１つで構成されている、請求項３、５、６または７に記載の電気光学素子用複合基板。

[請求項9] 前記電気光学結晶基板の厚みが０．１μｍ～０．８μｍである、請求項１から８のいずれかに記載の電気光学素子用複合基板。

[請求項10] 前記電気光学結晶基板の厚みが０．２μｍ～０．６μｍである、請求項９に記載の電気光学素子用複合基板。

[請求項11] 前記電気光学結晶基板が、ニオブ酸リチウム、タンタル酸リチウム、チタン酸リン酸カリウム、ニオブ酸カリウム・リチウム、ニオブ酸カリウム、タンタル酸・ニオブ酸カリウム、および、ニオブ酸リチウムとタンタル酸リチウムとの固溶体から選択される１つで構成されて

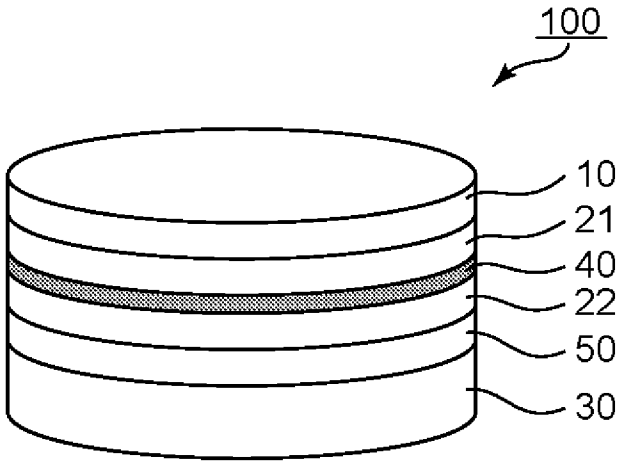
いる、請求項１から１０のいずれかに記載の電気光学素子用複合基板。

[請求項12] 前記第１の高誘電率層の厚みが０．０１μｍ～０．０８μｍであり、前記第２の高誘電率層の厚みが０．００１μｍ～０．０４μｍである、請求項１から１１のいずれかに記載の電気光学素子用複合基板。

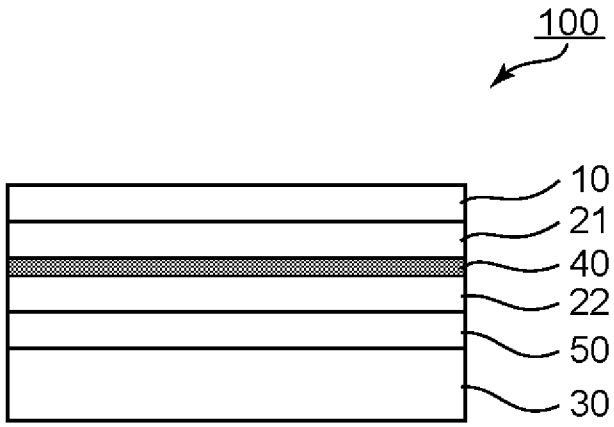
[請求項13] 前記第１の高誘電率層および前記第２の高誘電率層が、それぞれ、酸化タンタル、酸化ニオブ、酸化チタン、酸化アルミニウム、酸化ハフニウムおよびシリコンから選択される１つで構成されている、請求項１から１２のいずれかに記載の電気光学素子用複合基板。

[請求項14] 前記低誘電率層の厚みが１０μｍを超えて２０μｍ以下である、請求項３、５または７に記載の電気光学素子用複合基板。

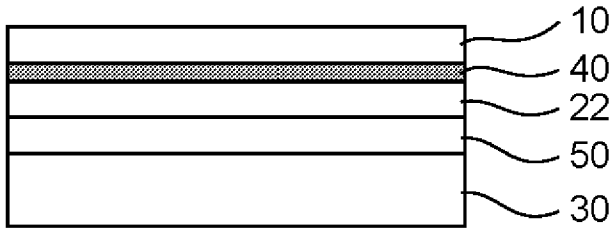
[図1]


100
10
21
40
22
50
30

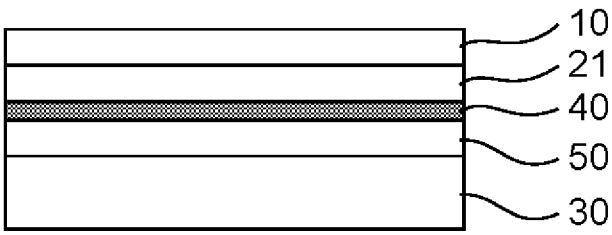
[図2]


100
10
21
40
22
50
30

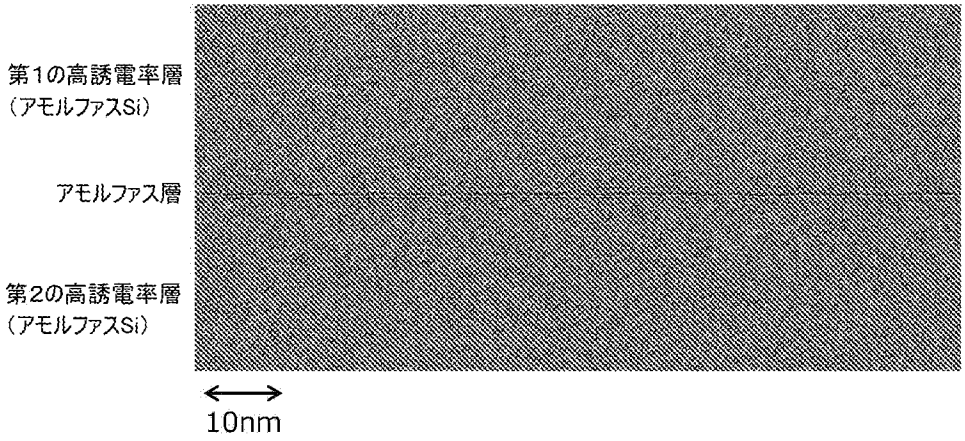
[図3]


10
40
22
50
30

[図4]


10
21
40
50
30

[図5]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2021/019037

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
B32B 15/04(2006.01)i; G02F 1/03(2006.01)i
FI: G02F1/03 505; B32B15/04 Z
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G02F1/00-1/125, G02F1/21-7/00, G02B6/12-6/14, B23K20/00-20/26, B32B1/00-43/00, C30B1/00-35/00, H01L21/00-21/02, H01L21/04-21/16, H01L21/304, H03H3/08-3/10, H03H9/145, H03H9/25, H03H9/42-9/44, H03H9/64, H03H9/68, H03H9/72, H03H9/76

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan	1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan	1971-2021
Registered utility model specifications of Japan	1996-2021
Published registered utility model applications of Japan	1994-2021

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	WO 2019/224908 A1 (NGK INSULATORS, LTD.) 28 November 2019 (2019-11-28) paragraphs [0002]-[0003], [0038]-[0040], [0045], [0048], [0065], [0074], [0084], [0086]-[0088], [0090], [0094]-[0101], fig. 14-15, 18-19, 22-29	1, 11, 13 2-10, 12, 14
Y	JP 2017-139720 A (SHIN-ETSU CHEMICAL CO., LTD.) 10 August 2017 (2017-08-10) paragraphs [0023]-[0053], table 2	2, 4, 12
Y	WO 2014/077212 A1 (NGK INSULATORS, LTD.) 22 May 2014 (2014-05-22) paragraphs [0021]-[0023], table 1	2, 4

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.
☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search 27 July 2021 (27.07.2021)	Date of mailing of the international search report 10 August 2021 (10.08.2021)
Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2021/019037

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	WO 2019/071978 A1 (JINAN JINGZHENG ELECTRONICS CO., LTD.) 18 April 2019 (2019-04-18) page 5, line 31 to page 6, line 7, page 6, line 28 to page 7, line 4, page 7, lines 11-16, page 8, line 14 to page 9, line 13, fig. 13	3-10, 14
Y	WO 2018/031916 A1 (PRESIDENT AND FELLOWS OF HARBARD COLLEGE) 15 February 2018 (2018-02-15) paragraphs [0066]-[0067], [0087]-[0090], fig. 5A, 11	6-10, 14
Y	JP 2010-211241 A (SUMITOMO OSAKA CEMENT CO., LTD.) 24 September 2010 (2010-09-24) paragraphs [0057]-[0058]	14
A	JP 6646187 B1 (NGK INSULATORS, LTD.) 14 February 2020 (2020-02-14) entire text, all drawings	1-14
A	US 2020/0013765 A1 (INVENSAS BONDING TECHNOLOGIES, INC.) 09 January 2020 (2020-01-09) entire text, all drawings	1-14
A	JP 2018-117030 A (SHIN-ETSU CHEMICAL CO., LTD.) 26 July 2018 (2018-07-26) entire text, all drawings	1-14
A	JP 2012-161831 A (MITSUBISHI ELECTRIC CORP.) 30 August 2012 (2012-08-30) entire text, all drawings	1-14
A	JP 2002-040381 A (NGK INSULATORS, LTD.) 06 February 2002 (2002-02-06) entire text, all drawings	1-14
A	JP 2019-217530 A (MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES MACHINE TOOL CO., LTD.) 26 December 2019 (2019-12-26) entire text, all drawings	1-14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2021/019037

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
WO 2019/224908 A1	28 Nov. 2019	US 2021/0072567 A1 paragraphs [0003]-[0004], [0039]-[0041], [0046], [0049], [0066], [0075], [0085], [0087]-[0089], [0091], [0095]-[0102], fig. 14-15, 18-19, 22-29 EP 3798718 A1 CN 112154368 A	
JP 2017-139720 A	10 Aug. 2017	US 2019/0036505 A1 paragraphs [0030]-[0061], table 2 EP 3413464 A1 KR 10-2018-0104610 A CN 108702141 A	
WO 2014/077212 A1	22 May 2014	US 2014/0210316 A1 paragraphs [0041]-[0042], table 1 EP 2787637 A1 CN 103999366 A KR 10-2014-0093658 A	
WO 2019/071978 A1	18 Apr. 2019	JP 2020-536841 A paragraphs [0038], [0044], [0047], [0054]-[0059], fig. 13 EP 3696869 A1 paragraphs [0037], [0043], [0046], [0052]-[0057], fig. 13 CN 108539009 A KR 10-2020-0040807 A	
WO 2018/031916 A1	15 Feb. 2018	CN 109844621 A	
JP 2010-211241 A	24 Sep. 2010	(Family: none)	
JP 6646187 B1	14 Feb. 2020	(Family: none)	
US 2020/0013765 A1	09 Jan. 2020	WO 2020/010056 A1 TW 202013436 A	
JP 2018-117030 A	26 Jul. 2018	US 2019/0386640 A1 EP 3573088 A1 TW 201832391 A CN 110140192 A KR 10-2019-0100285 A	
JP 2012-161831 A	30 Aug. 2012	(Family: none)	
JP 2020-040381 A	06 Feb. 2002	US 2002/0048076 A1 EP 1176455 A1 EP 1722266 A2	
JP 2019-217530 A	26 Dec. 2019	(Family: none)	

国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2021/019037

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

B32B 15/04(2006.01)i; G02F 1/03(2006.01)i
FI: G02F1/03 505; B32B15/04 Z

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

G02F1/00-1/125, G02F1/21-7/00, G02B6/12-6/14, B23K20/00-20/26, B32B1/00-43/00, C30B1/00-35/00, H01L21/00-21/02, H01L21/04-21/16, H01L21/304, H03H3/08-3/10, H03H9/145, H03H9/25, H03H9/42-9/44, H03H9/64, H03H9/68, H03H9/72, H03H9/76

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	１９２２－１９９６年
日本国公開実用新案公報	１９７１－２０２１年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０２１年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０２１年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー*	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
X	WO 2019/224908 A1 (日本碍子株式会社) 28.11.2019 (2019-11-28) 段落０００２－０００３、００３８－００４０、００４５、００４８、００６５、００７４、００８４、００８６－００８８、００９０、００９４－０１０１、図１４－１５、１８－１９、２２－２９	1, 11, 13
Y		2-10, 12, 14
Y	JP 2017-139720 A (信越化学工業株式会社) 10.08.2017 (2017-08-10) 段落００２３－００５３、表２	2, 4, 12
Y	WO 2014/077212 A1 (日本碍子株式会社) 22.05.2014 (2014-05-22) 段落００２１－００２３、表１	2, 4
Y	WO 2019/071978 A1 (JINAN JINGZHENG ELECTRONICS CO., LTD.) 18.04.2019 (2019-04-18) 第５頁第３１行－第６頁第７行、第６頁第２８行－第７頁第４行、第７頁第１１行－第１６行、第８頁第１４行－第９頁第１３行、図１３	3-10, 14

☑ Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。

☑ パテントファミリーに関する別紙を参照。

＊ 引用文献のカテゴリー
“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
“E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
“L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
“P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献
“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
“X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
“Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
“&” 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日
27.07.2021	10.08.2021

名称及びあて先
日本国特許庁(ISA/JP)
〒100-8915
日本国
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

権限のある職員（特許庁審査官）
井部　紗代子 2L 1170

電話番号 03-3581-1101 内線 3295

C.　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー*	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
Y	WO 2018/031916 A1 (PRESIDENT AND FELLOWS OF HARVARD COLLEGE) 15.02.2018 (2018-02-15) 段落００６６－００６７、００８７－００９０、図５Ａ、１１	6-10, 14
Y	JP 2010-211241 A (住友大阪セメント株式会社) 24.09.2010 (2010-09-24) 段落００５７－００５８	14
A	JP 6646187 B1 (日本碍子株式会社) 14.02.2020 (2020-02-14) 全文、全図	1-14
A	US 2020/0013765 A1 (INVENSAS BONDING TECHNOLOGIES, INC.) 09.01.2020 (2020-01-09) 全文、全図	1-14
A	JP 2018-117030 A (信越化学工業株式会社) 26.07.2018 (2018-07-26) 全文、全図	1-14
A	JP 2012-161831 A (三菱電機株式会社) 30.08.2012 (2012-08-30) 全文、全図	1-14
A	JP 2002-040381 A (日本碍子株式会社) 06.02.2002 (2002-02-06) 全文、全図	1-14
A	JP 2019-217530 A (三菱重工工作機械株式会社) 26.12.2019 (2019-12-26) 全文、全図	1-14

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号
PCT/JP2021/019037

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
WO 2019/224908 A1	28.11.2019	US 2021/0072567 A1 段落０００３－０００４、００３９－００４１、００４６、００４９、００６６、００７５、００８５、００８７－００８９、００９１、００９５－０１０２、図１４－１５、１８－１９、２２－２９ EP 3798718 A1 CN 112154368 A	
JP 2017-139720 A	10.08.2017	US 2019/0036505 A1 段落００３０－００６１、表２ EP 3413464 A1 KR 10-2018-0104610 A CN 108702141 A	
WO 2014/077212 A1	22.05.2014	US 2014/0210316 A1 段落００４１－００４２、表１ EP 2787637 A1 CN 103999366 A KR 10-2014-0093658 A	
WO 2019/071978 A1	18.04.2019	JP 2020-536841 A 段落００３８、００４４、００４７、００５４－００５９、図１３ EP 3696869 A1 段落００３７、００４３、００４６、００５２－００５７、図１３ CN 108539009 A KR 10-2020-0040807 A	
WO 2018/031916 A1	15.02.2018	CN 109844621 A	
JP 2010-211241 A	24.09.2010	（ファミリーなし）	
JP 6646187 B1	14.02.2020	（ファミリーなし）	
US 2020/0013765 A1	09.01.2020	WO 2020/010056 A1 TW 202013436 A	
JP 2018-117030 A	26.07.2018	US 2019/0386640 A1 EP 3573088 A1 TW 201832391 A CN 110140192 A KR 10-2019-0100285 A	
JP 2012-161831 A	30.08.2012	（ファミリーなし）	
JP 2002-040381 A	06.02.2002	US 2002/0048076 A1 EP 1176455 A1 EP 1722266 A2	
JP 2019-217530 A	26.12.2019	（ファミリーなし）	