

| | | | |
|---------|------------------------------|----|--------|
| 氏名 | 水越 光司 | | |
| 授与学位 | 博士(工学) | | |
| 学位記番号 | 博甲第206号 | | |
| 学位授与年月日 | 令和5年3月17日 | | |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項 | | |
| 学位論文題目 | Low-E膜の断熱性向上に及ぼす膜材料及び成膜手法の効果 | | |
| 論文審査委員 | 主査 | 教授 | 川村 みどり |
| | | 教授 | 阿部 良夫 |
| | | 教授 | 柴田 浩行 |
| | | 教授 | 松田 剛 |
| | | 教授 | 吉田 裕 |

学位論文内容の要旨

本研究は、住宅などの建築物の窓ガラスに付与されるLow emissivity (Low-E) 膜の断熱性向上に取り組んだものである。一般的に、Low-E膜は酸化金属膜/銀 (Ag) /酸化金属膜で構成され、スパッタリング法によってガラス上に成膜される。nmオーダー厚さの銀が室内の暖房の熱エネルギーである赤外線を反射し、可視光線は透過するため、断熱性と可視光透過性を両立できる。Ag膜の上下の層は、Ag膜の保護と性能を維持する役割を持つ。

本研究では、高い可視光透過率を維持しながら高断熱となるLow-E膜を実現するべく、膜構成や膜材料、成膜手法について検証し、断熱性能の指標となるAgの膜抵抗値の低減を目指すと共に断熱性に影響する因子を追求した。

文献では、Ag膜直下の酸化亜鉛 (ZnO) 膜の存在により、Ag(111)の配向性を高め電気抵抗率が低減されることが知られていたが、本研究では、更にZnO層下に最下層を挿入したガラス/最下層/ZnO/Agの構成でより抵抗率が低減できることを実証した。最下層物質としては、酸化チタン、酸化ニオブでは効果が確認できたが、酸化ジルコニウムでは効果が無いことも確認した。抵抗率低減とAg(111)の配向性、ZnO・Agの表面粗さ、ZnOの配向性には関係があり、最下層を挿入した構成では、ZnO(100)面間隔がバルク値より小さいと抵抗率が低減することを見出した。

また、抵抗率を低減する別手段として、Ag成膜中のプロセスガスであるアルゴンがAg膜中に取り込まれる現象が知られていることから、クリプトンへ変更することでAg多層膜の抵抗率が更に低減できることを見出した。

Ag膜上に酸化金属膜を成膜する際に、酸素プラズマによりAg層が酸化などのダメージを受けることが知られており、通常、ブロッカー(BL)層を挿入する。本研究では、アルミ、チタン、等種々のターゲットを用いて、アルゴン雰囲気又は、酸素が数%混在した雰囲気中でBL層を成膜した。その結果、メタルBL層では、構成原子がAg膜中に拡散する現象が確認された。

酸素雰囲気が高い場合も抵抗値の増大が認められ、微量の酸素(2.9%)を添加した雰囲気中で成膜したTiO_xがBL層として最適であることを見出した。更にその上に、ZnOトップ層を積層させた膜構成は、特に高い可視光透過率(86.4%)と高断熱となるLow-E特性(膜抵抗値2.4Ω/sq)を実現でき、恒温恒湿環境(45℃、95%RH、48h)での試験における耐久性も確認でき、実用材料としての適性を有することが判明した。近年の論文で報告されている膜抵抗値は2.7Ω/sqであり、複層ガラスの熱貫流率を試算・比較すると、断熱性を約0.01W/m²K(約1%)向上することができた。

以上の研究成果として、Low-E膜構成材料と成膜手法の最適化により、実用に耐え得る高断熱性能の膜構成を見出した。

審査結果の要旨

要旨

建築物の窓ガラスに付与される Low emissivity (Low-E) 膜は、一般的に、酸化金属膜/銀 (Ag) /酸化金属膜の構成であり、スパッタリング法によってガラス上に成膜され、断熱性と可視光透過性を両立している。本研究は、その膜構成や材料、成膜手法について検討し、断熱性能の指標となる膜抵抗値の低減を目指すと共に断熱性に影響する因子を追求した。

まず、Ag 膜直下に ZnO 層、更に最下層を挿入したガラス/最下層/ZnO/Ag の構成で、より抵抗率が低減できることを実証した。最下層物質としては、ZnO(100)面間隔を理論値より縮小できるものが有効であることを見出した。また、Ag 成膜中のプロセスガスを Kr へ変更することで Ag 多層膜の抵抗率が更に低減できることを見出した。次に、Ag 膜上に酸化金属膜を成膜する際のブロッカー(BL)層の最適化を図り、種々の金属膜を検討した。その結果、メタル BL 層では全般的に構成原子が Ag 膜中に拡散する現象が、酸素雰囲気でも膜の抵抗値の増大が認められ、微量の酸素を添加した雰囲気で得られた TiO_x が BL 層として最適であることを見出した。最後に、ZnO 最上層を積層させた膜構成が近年の報告例を上回る高い物性と耐久性を示し、実用材料としての適性も確認した。

以上の結果から、Low-E 膜構成材料と成膜手法の最適化により、実用に耐え得る高断熱性能の膜構成を見出したことは工学上重要な知見で、薄膜材料工学分野における学術的貢献も大きい。よって、申請者は北見工業大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認められる。