

Entwicklung von passiven und aktiven, planaren SiO₂ Wellenleitern auf Silicium mittels rapid thermal annealing

M. Mennig, A. Gier, A. Berni, H. Schmidt
Institut für Neue Materialien INM, gem. GmbH; Saarbrücken

Einleitung

Für die optische Nachrichtentechnik ist die Entwicklung von leistungsfähigen, passiven und aktiven Lichtwellenleitern über kostengünstige Verfahren von entscheidender Bedeutung. Die Herstellung solcher optischer Komponenten erfolgt bisher mittels Ionenaustausch [1] und unterschiedlicher PVD [2] und CVD Prozesse [3]. Diese Techniken bieten die Möglichkeit zur Herstellung von 10 - 20 µm dicken SiO₂ Schichten und von bis zu 15 µm dicken Erbium-dotierten Schichten auf Silizium [2]. Diese Prozesse sind aber kostenaufwendig und zeitintensiv, so daß eine großtechnische Umsetzung noch behindert wird.

Mit Beschichtungssolen, die nach der bekannten Alkoxidroute synthetisiert wurden und sich prinzipiell auch zum Einbau von Er³⁺ eignen, können jedoch nur Schichten von wenigen 100 nm Dicke hergestellt werden, da es aufgrund des geringen Feststoffgehaltes zu starker Schrumpfung und dadurch zu Zugspannungen kommt. Holmes und Syms [4, 5] konnten zwar zeigen, daß man über ein Rapid Thermal Annealing (RTA) die Spannungsbildung in SiO₂-Schichten auf Si-Wafer beeinflussen kann, entsprechende Wellenleiter mit einer Schichtdicke von 10 µm mußten trotzdem aus 100 Einzelschichten von je 100 nm aufgebaut werden, wobei eine Dämpfung von 0,5 dB / cm erreicht wurde.

Das Ziel der Untersuchungen bestand darin, wellenleitende Schichten mit Dicken von 5 ... 10 µm, sowie niedriger Dämpfung mit möglichst wenigen Einzelschritten auf 4" Wafer aufzubauen. Dazu sollten Sole mit nanoskaligen Partikeln als transparenter Füllstoff in Kombination mit RTA eingesetzt werden. Neben der Dotierung mit Al₂O₃ zur Brechzahlerhöhung sollte eine zusätzliche Dotierung mit Er₂O₃ die Herstellung aktiver Wellenleiter ermöglichen.

Experimentelles

Zur Herstellung der SiO_2 -Bufferschichten wurde ein Sol auf der Basis von Tetraethoxysilan (TEOS) und untereinander unvernetzten, kugelförmigen amorphen SiO_2 -Partikeln verwendet [6]. Zur Synthese der wellenleitenden Schichten wurde das SiO_2 -Sol zusätzlich mit Aluminium- und Erbiumalkoxiden versetzt. Das Sol wurde mittels Spin-coating auf 4"-Silicium-Wafer aufgebracht und anschließend einem Rapid Thermal Processing unterworfen. Dabei wurde innerhalb von 5 s auf 990 °C erhitzt, 10 s die Temperatur gehalten und mit einer Abkühlrate von 60 K / s auf 300 °C abgekühlt. Dieser Vorgang wurde bis zu 5 mal wiederholt. Die Atmosphäre bestand während des ersten Aufheizvorgangs aus einem N_2 - O_2 -Gemisch sonst aus reinem N_2 .

Ergebnisse und Diskussion

Zur Herstellung eines wellenleitenden Mehrschichtsystems, mußte in einem ersten Schritt eine vollständig verdichtete SiO_2 -Schicht mit ausreichender Dicke auf Silizium appliziert werden. Hierzu wurde das Temperatur-Zeit-Programm des RTA optimiert, so daß durch Heiz- und Kühlzyklen (990 °C, 30 s) ca. 1 µm dicke SiO_2 -Schichten mit geringen Druckspannungen verdichtet werden konnten. Jede Wiederholung des Verdichtungszyklus führt nach erneuter Beschichtung wieder zu Druckspannungen, so daß auf diese Weise zugspannungsfreie Mehrfachbeschichtungen aufgebaut werden können. Um die Ausbildung der kieselglasartigen Struktur bei einer Verdichtung von 990°C als Funktion der Zyklenzahl zu untersuchen, wurde der oben beschriebene Heizzyklus bis zu 5 mal wiederholt und anschließend die Brechzahl n_D ellipsometrisch bestimmt. Bild 1 zeigt das Ergebnis.

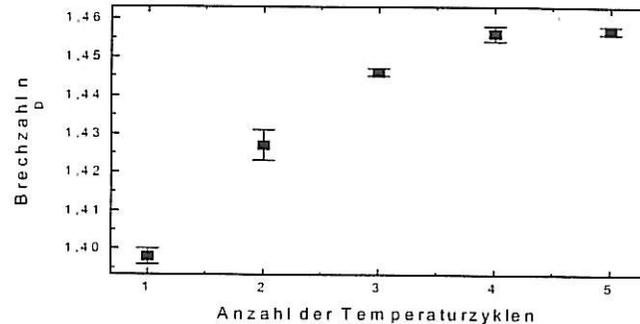


Bild 1: Abhängigkeit der Brechzahl von der Anzahl der aufeinanderfolgenden Temperaturzyklen im RTA

Zieht man die Brechzahl als Maß für die Verdichtung der Schichten heran, so erkennt man aus Bild 1, daß bereits nach 4 Heizzyklen die vollständige Verdichtung der Schichten erfolgt ist. Neben einer ausreichend hohen Schichtdicke ist weiterhin die Schichtdickenhomogenität für eine geringe Dämpfung entscheidend. Hierzu wurde interferometrisch die Rauigkeit der Schichtoberfläche nach 11 aufeinanderfolgenden Beschichtungen mit anschließendem RTP analysiert. Bild 2 zeigt die Abweichung der Schichtdicke vom Mittelwert von 5133 nm.

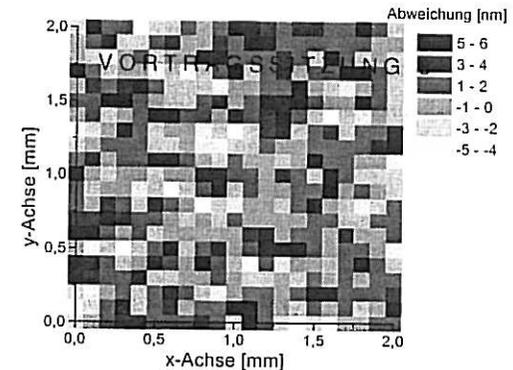


Bild 2: Darstellung der Oberflächenunebenheiten einer Mehrfachschicht nach RTA. Die Angaben beziehen sich auf die Abweichung vom Durchschnittswert von 5133 nm.

Die Schichtdickenschwankungen liegen mit etwa 11 nm bei einer Schichtdicke von ca. 5 µm im Bereich von 10^{-3} % und erscheint damit prinzipiell für die Wellenleiterherstellung geeignet. Die Verhinderung von Partikelablagerungen beim Mehrfachbeschichtungsprozeß muß durch geeignete Reinraumtechnologie erreicht werden. Durch die Verwendung von Al_2O_3 und Er_2O_3 als Dotierungsmaterialien konnte ein ausreichend hoher Brechzahlhub zwischen dotierter und Bufferschicht erzielt werden. Folgende Tabelle zeigt die hergestellten Schichten und ihre Brechzahlen.

Tabelle 1: Hergestellte Schichtsysteme und deren Brechungsindex n_D

Dotierung	Brechungsindex n_D ($\pm 0,001$)
ohne	1,457
Al_2O_3 (4 mol %)	1,466
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Er}_2\text{O}_3$ (4; 0,7 mol %)	1,468

In Wellenleitern werden optische Verluste durch Streuung an Inhomogenitäten und Absorption hervorgerufen. Die Hauptquellen für Absorptionsverluste im NIR in den über das Sol-Gel-Verfahren hergestellten SiO_2 -Schichten stellen OH-Schwingungen dar. So besitzen isolierte OH-Gruppen eine Oberschwingung bei etwa $1,33 \mu\text{m}$ Wellenlänge. Außerdem können Kombinationsschwingungen mit CH-Gruppen bei etwa $1,5 \mu\text{m}$ Wellenlänge auftreten. Daher ist die Minimierung des Si-OH-Anteils wichtig. Der OH-Gehalt berechnet sich aus einem angefertigten IR-Spektrum für diese Schicht zu $0,0524 \text{ mol/l}$, was einen Wert von 399 ppm ergibt. Diesen relativ hohen OH-Gehalt in den Beschichtungen gilt es in weiterführenden Untersuchungen zu verringern, was z. B. durch einen nachgeschalteten Verdichtungsprozeß unter N_2 erfolgen könnte.

Um Lichtwellenleitung an den dotierten Schichten nachzuweisen, wurden Doppelschichtpakete aus ca. $4 \mu\text{m}$ dicken SiO_2 -Bufferschichten und ca. $4 \mu\text{m}$ Al_2O_3 - bzw. Er_2O_3 -dotierten Schichten hergestellt, an denen Lichtwellenleitung mittels Prismenkopplung nachgewiesen werden konnte. Die Dämpfungsverluste bei 1300 nm sind für TE $3,7 \text{ dB/cm}$ sowie für TM $3,2 \text{ dB/cm}$ bei einem Fehler von ca. $\pm 0,2 \text{ dB/cm}$. Diese hohen Dämpfungswerte sind mit sehr großer Wahrscheinlichkeit auf eine noch zu geringe Bufferschichtdicke zurückzuführen.

Durch die Verwendung eines organikfreien Nanokompositsols konnte der Stand der Technik deutlich übertroffen werden, denn für eine Gesamtschichtdicke von $5 \mu\text{m}$ werden nur 10 Einzelbeschichtungen benötigt. Eine Minderung der Dämpfung bei $1,3 \mu\text{m}$ und $1,55 \mu\text{m}$ Wellenlänge könnte somit einerseits durch eine Reduzierung des OH-Gehaltes in den Beschichtungen, die Erhöhung der Bufferschichtdicke auf mindestens $10 \mu\text{m}$ sowie eine Erhöhung des Brechungsindexunterschiedes zwischen Buffer- und Kern erzielt werden.

-
- [1] S. J. Najafi, Artech House, Boston (1992)
 - [2] J. Shmulovich, A. Wong, Y. H. Wong; *Electr. Letters* 28 (13) (1992), 1181
 - [3] G. Babrossa, P. J. R. Laybourn; *SPIE Proc.* 1513 (1991)
 - [4] R. R. A. Syms; *J. Non-Cryst. Sol.* 167 (1994) 16-20
 - [5] R.R. A. Syms, A. Holmes; *J. Non-Cryst. Sol.* 170 (1994) 223
 - [6] M. Mennig, H. Schmidt BMBF Abschlußbericht Nr. 03M2721 B9