

5 Applikation laser-bearbeiteter Gläser

Ein Teil dieser Arbeit wurde im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „Abtragen mit Laserphotonen – Präzise Bearbeitung von Glas- und Verbundwerkstoffoberflächen“ durchgeführt [RUD00]. Das spezielle Teilprojekt dieses Verbundes hatte die Zielsetzung, teure kristalline Substrate durch laserstrukturierte kostengünstige Gläser zu ersetzen. Als Koordinator fungierte das Institut für Kristallzüchtung (IKZ); weitere Partner waren Schott Jenaer Glas GmbH und das Max-Born-Institut (MBI).

Kristalline Funktionsschichten besitzen für eine Reihe von Anwendungen eine große Bedeutung, so z.B. in der Photovoltaik, der Display-Technik oder der Mikromechanik. Glas als amorphes Substrat verfügt aber nicht über die Fähigkeit, epitaktisch kristalline Schichten aufwachsen zu lassen. Die Ursache liegt im Fehlen eines kristallographischen Gitters der Unterlage. Fügt man nun Mikrostrukturen in die Glasoberfläche ein, so ist zwar nicht damit zu rechnen, daß eine einkristalline Schicht auswächst, aber eine geschlossene polykristalline Schicht mit einheitlicher Textur erscheint möglich. Eine kristalline Siliziumschicht auf Glas könnte als Dünnschichtsolarzelle fungieren und wäre demnach ein denkbarer kostengünstiger Ersatz für teure kristalline Substrate.

Die Idee ist nun, Mikrostrukturen auf der Glasoberfläche einzubringen, die sozusagen als „Anker“ der kristallinen Siliziumschicht dienen. Aus ihnen züchtet man mittels der selektiven Keimbildung gut haftende Silizium-Depositkristallite, um diese anschließend zu geschlossenen Schichten auswachsen zu können.

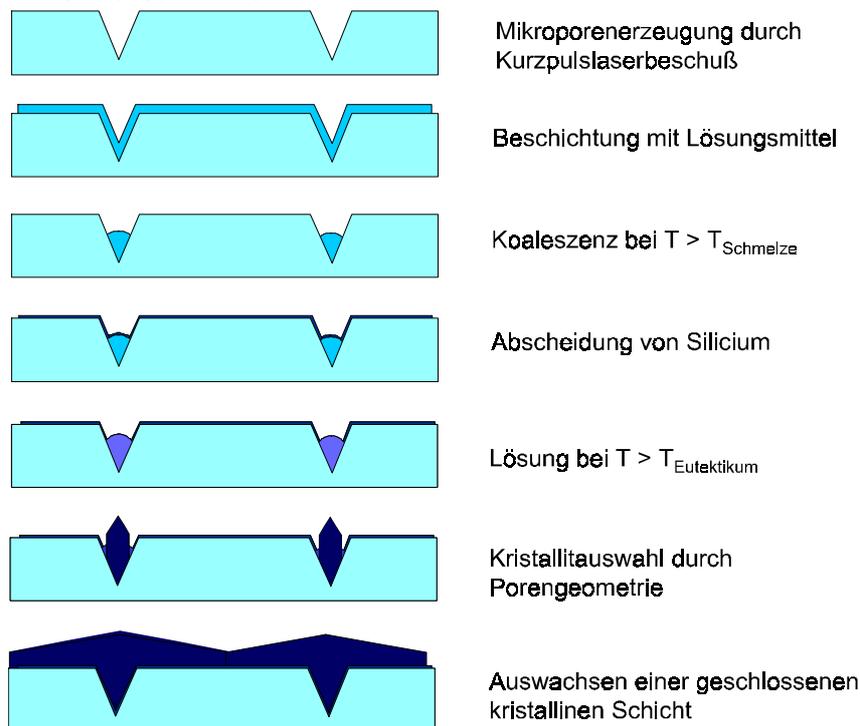


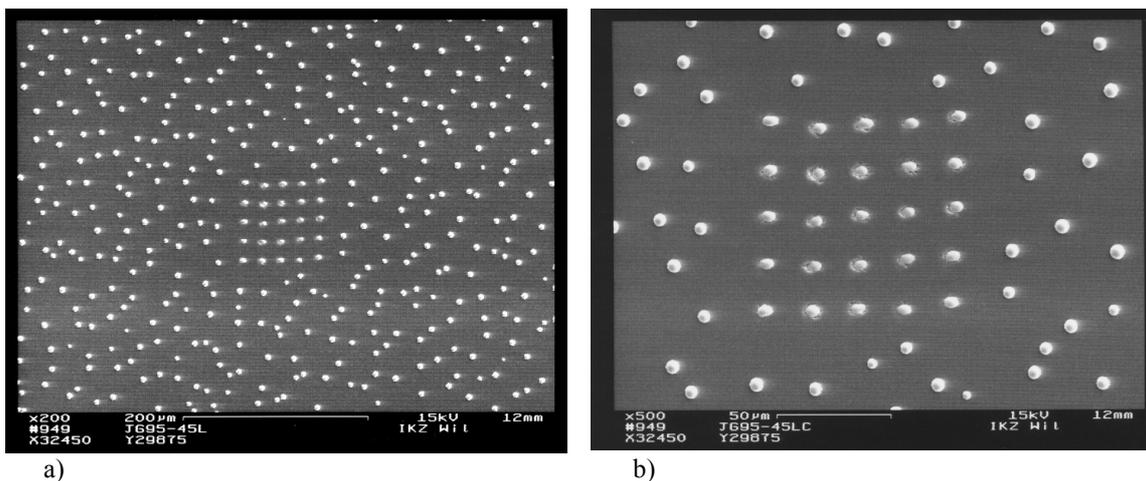
Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des Kristallzüchtungsprinzips [nach T. Boeck, IKZ].

Die Aufgabe bestand darin, auf dem Spezialglas von Schott, Jenaer Glaswerk GmbH Reliefstrukturen herzustellen, die aus lochartigen, kegelförmigen Einzelstrukturen mit Durchmesser von $\leq 1 \mu\text{m}$ und Tiefen von 10 nm bis $1 \mu\text{m}$ bestehen. Die matrixförmige Anordnung

der Kavitäten bildet das Array für die am IKZ neu entwickelte und durchgeführte Kristallzüchtungsmethode [BOE96], [BOE99a], [BOE99b]. Das Züchtungsprinzip ist in Abbildung 5.1 schematisch dargestellt.

Auf der laserstrukturierten Glasoberfläche wird durch widerstandsgeheizte Verdampfung eine metallische Lösungsmittelschicht abgeschieden. Bei Temperaturen oberhalb des Schmelzpunktes des Metalls kommt es zu einem natürlichen Koaleszenzphänomen aufgrund des Bestrebens, die Oberflächenenergie zu minimieren. Die Anreicherung des metallischen Lösungsmittels in den Mikroporen erfolgt durch Kapillarwirkung. Es bilden sich sozusagen Lösungsmittelreservoirs, in denen sich das mittels Elektronenstrahlverdampfung abgeschiedene Silizium bei einer bestimmten Temperatur löst. Stellt man einen stationären Temperaturgradient zwischen der Substratvorderseite (Lichtheizung) und der –rückseite (aktive Kühlung) ein, so bilden sich Keime aus Silizium in den Poren. Diese Temperaturdifferenz stellt die thermodynamische Triebkraft für den Materialtransport und die Keimbildung dar. Durch die Geometrie der kegelförmigen Mikroporen kommt es zu einer Kristallitauswahl, so daß nur jeweils ein Kristallit aus jeder Pore wächst. Hierbei sind die Dimensionen der Mikropore wesentlich [TEU99]. Das Silizium, das sich jenseits der Strukturelemente abscheidet, besitzt amorphes oder mikrokristallines Charakter. Im abschließenden Schritt wird durch Flüssigphasenepitaxie (LPE) eine Epitaxieschicht erzeugt, wobei die arrayförmig angeordneten Si-Kristallite als Wachstumszentren fungieren.

Ohne die Mikroporen könnte man auch Si-Kristallite aus Lösungsmitteltröpfchen wachsen lassen, ihre Verteilung wäre aber rein statistisch. Ein Beispiel für eine mit einem Array von (5x5)-Löchern strukturierte Glasoberfläche zeigt Abbildung 5.2. Deutlich sichtbar ist die Konzentration von je einem Lösungsmitteltröpfchen in einer Mikropore, aus dem im weiteren Züchtungsverlauf je ein Silizium-Kristallit wachsen wird. Außerhalb des Arrays befinden sich ebenfalls Lösungsmitteltröpfchen, da auch hier das Koaleszenzphänomen wirkt; aber die Verteilung ist rein statistisch, und ein großflächiges Überwachsen einer kristallinen Funktionsschicht ist in diesem Bereich erschwert.



a) b)
Abbildung 5.2: REM-Aufnahmen von einer mit dem Laser arrayförmig strukturierten Glasoberfläche (5x5 Löcher im Abstand von ~20 µm) [MBI]. a) 200-fache Vergrößerung; b) 500-fache Vergrößerung [IKZ]. In jeder Mikropore befindet sich je ein Lösungsmitteltröpfchen. Außerhalb sind die Lösungsmitteltröpfchen rein statistisch verteilt.

Angesichts der Prozeßtemperaturen um 600°C bei der Beschichtung und Kristallzüchtung muß ein Spezialglas mit einem entsprechend hohen Transformationspunkt gewählt werden. Im Hinblick auf die erwähnten technischen Anwendungen ist es ein notwendiges Kriterium

für die Substrate und für alle technologischen Prozesse, daß sie kostengünstig und großflächig herstellbar bzw. anwendbar sind. In der Photovoltaik dürfen für eine Dünnschichtsolarzelle die Substratkosten in der Großproduktion 50 US\$ pro m² nicht übersteigen [HEL99]. Gläser, die sich für diese thermische und physiko-chemische Belastung eignen und zudem keine alkalischen Komponenten enthalten, konnten vor der Entwicklung des Spezialglases bei Schott, Jenaer Glaswerk (Näheres zum Jenaer Glas in Kapitel 3.1.1) nur zu einem hohen Preis aus den USA (Corning 7059) importiert werden. Ihr Einsatz blieb somit eher auf Laboranwendungen beschränkt.

Nimmt man einen Abstand der Mikrokavitäten von 100 µm an, so ergeben sich für einen Quadratmeter 10⁸ Poren. Bei dieser Anzahl läßt sich leicht nachvollziehen, warum eine berührungslose Bearbeitungsmethode die kostengünstigste Strukturierung großer Flächen darstellt. Zudem würde eine chemische Strukturierung nur in einer regellosen Anordnung und Größe der Poren resultieren. Bei einer mechanischen Methode wie dem Mikrintenden erscheint zum einen das Potential für eine großflächige Applikation begrenzt zum anderen konnten nicht die gewünschten Geometrien erzeugt werden.

Der Vorteil der Laserstrukturierung gegenüber z.B. der klassischen Graphoepitaxie liegt vor allem im berührungslosen Materialabtrag. Zudem ist die abzutragende Schicht selektierbar und eine Naßchemie mit eventuell toxischen Substanzen kann vermieden werden. Des weiteren kann ein Laser mit hohen Wiederholraten und der Möglichkeit zur Strahlvervielfachung sein „Ausgangspotential“ noch vervielfachen, und die gesamte Prozeßkette kann automatisiert werden. Jedoch stößt die Forderung nach einer optimalen Geometrie der Mikroporen von 1 µm im Durchmesser und in der Tiefe auch an die Grenzen der Machbarkeit in der Laser-Mikromaterialbearbeitung.

Die Zukunft für derartige Strukturen liegt sicher in der Verwendung ultravioletter Wellenlängen, denn sie können durch lineare Absorption besser in die Glasmatrix eingekoppelt werden. Bei entsprechender Strahlformung konnten bereits mit Nanosekundenpulsen beeindruckende Ergebnisse erzielt werden [FIM00]. Die Hoffnung für die Glasbearbeitung mit dem Laser ruht aber auf der Entwicklung eines im ultravioletten Spektralbereich arbeitenden Femtosekunden-Lasersystems. Dabei könnten beide Vorteile genutzt werden: die gute Absorption der Laserstrahlung und die erhöhte Präzision bei Verwendung ultrakurzer Laserpulse.

