

1. Forschungsthema

Untersuchungen zum selektiven Laserabtrag dünner Funktionsschichten für die Photovoltaik, Displaytechnologie und Mikroelektronik

2. Wissenschaftlich- technische und wirtschaftliche Problemstellung

Wirtschaftliche Problemstellung

Fast drei Milliarden Euro setzten die Photovoltaik-Unternehmen aus Deutschland im Jahre 2006 um. Für nachhaltige wirtschaftlichen Erfolge sind hierbei die weitere Senkung des Materialverbrauchs und die Anwendung Kosten sparender Prozesstechnologien erforderlich. Im Zentrum zukünftiger Entwicklungen der Einsatz von Dünnschichttechnologien: Materialschichten bis wenige μm Stärke, die auf kostengünstigen Trägermaterialien wie Glas oder Polymerfolien aufgetragen werden. Die derzeit aussichtsreichsten Materialoptionen sind dabei amorphes und nanokristallines Silizium, polykristallines Silizium, hochabsorbierende Verbindungshalbleiter und organische Halbleiterverbindungen verwendet. Transparente Halbleiterschichten, z.B. ITO, werden sowohl in der Photovoltaik, Displaytechnologie als auch in der Mikroelektronik eingesetzt. Die Vorteile der Laserbearbeitung, z.B. zur Herstellung von Isolationsgräben, werden zunehmend auch in der Wirtschaft erkannt.

Für eine nachhaltige wirtschaftliche Umsetzung von Laser Bearbeitungsverfahren ist eine deutliche Optimierung notwendig, insbesondere eine Zunahme in der Prozessgeschwindigkeit **und** Präzision, z.B. eine Minimierung von unerwünschten Schäden am Rand der Bearbeitungszone und am Trägermaterial. Diese Kombinations-Forderung stellt nicht notwendigerweise einen Widerspruch dar, wenn die physikalischen Prozesse in der Laseranregung und Materialreaktion besser verstanden und optimal umgesetzt werden. Die **Optimierung der Laserstrukturierung und selektiven Mikroabtrag von dünnen Funktionsschichten** charakterisiert wesentliche Vorhabensziele.

Von den zu erwartenden Verwertungspotenzial profitieren gerade kleine und mittlere Unternehmen aus Lasertechnik, Optischen Technologien, Sondermaschinenbau, Werkstofftechnik und auch die Produzenten von Endprodukten in der Solarindustrie, Hersteller von Flachbildschirmen und Mikroelektronik. Die Arbeiten in diesem Forschungsvorhaben liefern wichtige Erkenntnisse zur (marktgerechten) Bewertung des Einsatzes neuer Laserparameter (Picosekunden Lasersysteme), schneller Strahlführung (Scanner- und Trepaniersysteme), spezieller Optiken (Strahlumformungssysteme) und zu relevanten Prozessüberwachungssysteme zur erfolgreichen selektiven Laser Mikrobearbeitung unterschiedlicher dünner Funktionsschichtsysteme auf Glas und Polymerträger.

Technische Problemstellung

In der Solar-Dünnschichttechnologie werden zur Isolierung zwischen den aufeinander folgenden Beschichtungsprozessen zum Aufbringen der Elektroden- und Halbleiterbeschichtungen die Schichten in den so genannten Prozessschritten P1, P2 und P3 mit dem Laser in elektrisch voneinander isolierte Streifen aufgeteilt, also strukturiert. Hierbei wird zwischen benachbarten Streifen bzw. Zellen ein Strompfad zwischen der Frontelektrode der einen und Rückelektrode der anderen Zelle realisiert, der einer seriellen Verschaltung beider Zellen entspricht.

Mit der zum Teil stürmischen Weiterentwicklung neuer optischer Schlüsseltechnologien existiert eine zunehmende Auswahl an industrietauglichen Lasersystemen. Besonders modengekoppelte Oszillatorsysteme, zum Teil mit Nachverstärkung, die Laserimpulse mit einer Pulsbreite zwischen 0,1 und 50ps und Einzelimpulsenergien unter 1mJ liefern, erscheinen für den Laserabtrag dünner Schichten geeignet. Der Einsatz ultrakurzer Laserimpulse liefert gegenwärtig bei der Laserbearbeitung dünner Schichten die besten Voraussetzungen für eine Minimierung der thermischen und mechanischen Randschädigung. Für die technische Umsetzung sind neben der Auswahl der geeigneten Strahlquelle(n) weitere Faktoren von entscheidener Bedeutung:

- Strahlbündelung der Einzelimpulse auf eine ausreichende Energiefussdichte oberhalb der Bearbeitungsschwelle
- Schnelle Verteilung der Einzelimpulse auf ausreichende effektive Anzahl von Impulsen pro Flächenelement

- Optimierung der räumlichen Intensitätsverteilung (z.B. von Gauß auf „top hat“ Profil) zur Vermeidung von Randeffekten bzw. unerwünschten Modifikationen unterhalb der Bearbeitungsschwelle

Zur Optimierung des Verfahrens wird erwartet, dass Ablenkungssysteme zur schnellen Verteilung der Laserimpulse auf die zu bearbeitende Schicht von großer Bedeutung sind. Neben dem Einsatz von Scannersystemen bietet sich sowohl alternativ als auch in Kombination die an der LMTB GmbH entwickelten und patentierten Optiksyste me zur Realisierung einer schnellen kreisförmigen und linearen Strahlablenkung.

Wissenschaftliche Problemstellung

Die besten Bearbeitungsergebnisse hinsichtlich Minimierung der Randschädigung werden bei angepasster Einstellung der Laser-Energieflussdichte am Ort des gewünschten Abtrags erzielt. Die Anpassung orientiert sich an den Bearbeitungsschwellen $F_{th,n}$ die Schlüssel zur Optimierung von Laser basierenden Bearbeitungsprozessen darstellen.

Abb. 1 skizziert eine mögliche Aufteilung der beobachteten Materialreaktionen und entsprechenden Bearbeitungsschwellen bei einer Gauß Intensitätsverteilung der Laserenergie (Intensität) auf der Probe (Schicht auf Glasträger). Beispielsweise charakterisiert Schwelle $F_{th,1}$ im Umfeld der maximalen Intensität einen vollständiger Abtrag der Dünnschicht mit leichter Schädigung des Glassubstrates oder anderen Trägermaterials, $F_{th,2}$ ($< F_{th,1}$) einen vollständiger Abtrag der Dünnschicht ohne Beeinträchtigung im Trägermaterial, $F_{th,3}$ ($< F_{th,2}$) eine Oberflächenmodifikation ohne erkennbaren (signifikanten) Abtrag, $F_{th,4}$ ($< F_{th,3}$) das Ablösen der Schicht von dem Trägermaterial durch thermische oder mechanische Randeffekte. Weitere Laser induzierte Modifikationen mit entsprechenden Schwellen $F_{th,n}$ können weitere (noch nicht bekannte) Umwandlungsprozesse sein.

Der Einfluss der materialabhängigen Elektronen-Phononen-Kopplung liefert bei der Anregung mit ultrakurzen Impulsen deutliche Unterschiede in der Elektronendiffusion (Energieverlust) vor dem Einsetzen eines Temperaturgleichgewichts zwischen dem angeregten freien Elektronen und dem Gitter. Untersuchungen mit Femtosekunden Laserimpulsen (bei 400nm) verdeutlichen die starke Abhängigkeit der Bearbeitungsschwelle F_{th} von der Schichtdicke d . Durch die Bestimmung der Bearbeitungsschwelle in Abhängigkeit von Laserparametern und Schichtdicke lassen sich umsetzungsrelevante Erkenntnisse erzielen.

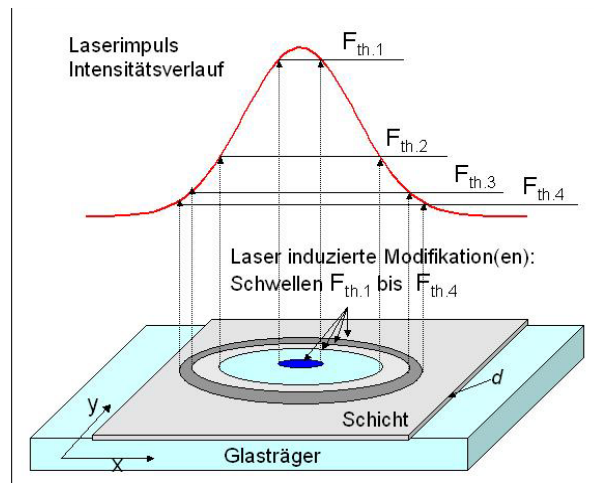


Abb. 1: Skizzierung des möglichen Einflusses eines Laser Einzelimpulses mit Gauß Intensitätsverteilung bei der Wechselwirkung mit einer dünnen Schicht auf einem Glasträger, siehe Text.

3. Forschungsziel / Ergebnisse / Lösungsweg

3.1 Forschungsziel

Das übergreifende Forschungsziel ist ein besseres Verständnis der Wechselwirkungsmechanismen ultrakurzer Laserimpulse mit (transparenten) dünnen Funktionsschichten mit einer Schichtdicke von wenigen 10 nm bis einigen μm , die eine Verwendung in der Photovoltaik, Display- und Beleuchtungstechnologie und in der Mikroelektronik finden.

3.1.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Die Ergebnisse sollen zu den folgenden Punkten mehr Klarheit liefern:

1. Identifizierung der erwarteten unterschiedlicher Materialreaktionen nach Einwirkung von ultra-kurz gepulster Laserstrahlung mit Gauß-Intensitätsverteilung, Zuordnung von Bearbeitungsschwellen - Abtrag, Schmelzbildung, Rauigkeitsänderung, Ablösung vom Trägermaterial, etc. : $F_{th,1}, F_{th,2}, \dots, F_{th,n}$.
2. Tendenzfeststellung zum Einfluss des Strahldurchmessers auf $F_{th,n}$.

3. Ermittlung des Inkubationsverhaltens: Einfluss der mittleren Schussanzahl auf $F_{th,n}$ und Einfluss des Zeitabstands zwischen nachfolgenden Anregungsprozessen (Wiederholrate 10 bis 640kHz) auf $F_{th,n}$.
4. Einfluss der Schichtdicke auf $F_{th,n}$, z.B. für Mo und a-Si.
5. Einfluss der Wellenlänge (1064, 532, 355nm) auf $F_{th,n}$.
6. Einfluss der Einkopplungsseite (Anmerkung: transparente Träger erlauben die Bearbeitung der Schicht von der Rückseite, was die Einkopplung der Laserenergie an der inneren Grenzfläche erwarten lässt)
7. Einzelvergleiche mit „konventioneller“, güte-geschalteter Lasertechnologie mit ca. 30ns Impulsbreite (Einfluss der Wärmediffusion) und mit Picosekunden Laserimpulsen sehr hohen Wiederholraten ab 50MHz (Abstand zwischen den Impulsen ≤ 20 ns) -> siehe Punkt 3.
8. Auswirkung auf $F_{th,n}$ (und Bearbeitungsqualität) bei Änderung der räumlichen Intensitätsverteilung von Gauß auf „top-hat“ Strahlprofil. (Anmerkung: es werden auch deutliche Unterschiede bezüglich nicht-linearer Effekte in der Anregung zwischen Gauß und „top hat“ Profil erwartet, die je nach Anwendung sich vor- oder nachteilig für die gewünschte Applikation auswirken können).
9. Vergleich und Bewertung verschiedener Oberflächenanalysemethoden (REM, AFM, LSM, optische Mikroskopie) zur Identifizierung unterschiedlicher Laser induzierter Modifikationen in der Dünnschicht (und im Trägermaterial) -> siehe Punkt 1.
10. Einsatz und Bewertung (einfacher) Methoden (z.B. ortsaufgelöste Streulichtanalyse) zur in-situ Beobachtung unterschiedlicher Laser induzierter Modifikationen in der Dünnschicht (und im Trägermaterial) -> siehe Punkt 1.
11. Zeitaufgelöste Untersuchung (mit sub-ns Auflösung) in pump-probe Anordnung zur Verfolgung der Materialreaktionsdynamik -> siehe Punkt 8 und 3.
12. Ermittlung der Prozessgrenzen für vollständiger Isolation (Widerstandsmessung): Spezifizierung von geeigneten Laserquellen, spezieller Optiken, Ablensysteme und Prozesskontrollsysteme.

Wirtschaftliche Ergebnisse

Die erwarteten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse werden verschiedenen Industriezweigen Hilfestellung für eine marktgerechte Umsetzung geben:

Ergebnisorientierung	Industriezweig	Hilfestellung
Identifizierung geeigneter Laserparameter zur Isolation bestimmter Dünnschichten bei festgelegter minimaler Prozessgeschwindigkeit	Laserhersteller, OEM Systeme für Sonderanlagen	Entwicklung marktgerechter Lasersysteme (Optimierung der cost of ownership)
Identifizierung geeigneter optischer Strahlführungs- und Strahlumformungsoptiken	Hersteller von optischen Systemen: Scanner, Homogenisierer, Mikrooptiken, Diffraktive Optiken, etc.	Abgestimmte Auswahl an optischen Komponenten, Entwicklung komplexer optischer Komplettsysteme
Entwicklung von innovativen Umsetzungsstrategien, inkl. Prozesskontrolle	Sonderanlagenbau	Wertvolle Information zur Machbarkeit, technologische Risikoabschätzung und Optionen bei der Integration relevanten Komponenten (optische Werkzeuge) in einem stark boomenden Markt.
Analyse der Laser Bearbeitung: Abtrag und andere mögliche Modifikationen	Photovoltaik, Displaytechnologie, Mikroelektronik, Hersteller von Funktionsschichten	Bewertung neue Schlüsseltechnologien für eine (mögliche) industrielle Fertigung der neusten Generation von Endprodukten: Anforderungsprofil hinsichtlich potentieller Anlagenumsetzung

3.1.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Der innovativer Beitrag wird in Teilbereichen durch die Entwicklung neuer Verfahren erzielt, bzw. erschließt die Weiterentwicklung eines noch sehr junges Verfahrens. In diesem Vorhaben werden die bisher ausschließlich punktuell erzielten Ergebnisse zum Abtrag dünner Funktionsschichten mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung systematisch erweitert, charakterisiert und physikalisch bewertet. Erst auf der Basis der im Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse lassen sich detaillierte Optimierungsstrategien hinsichtlich Bearbeitungspräzision und -geschwindigkeit entwickeln, die eine notwendige Voraussetzung für eine nachhaltige Umsetzung darstellen.

3.2. Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Die im Vorhaben geplanten Arbeitsschritte sind in erster Linie experimenteller Natur: Basis-Lichtquelle für die Wechselwirkung mit den Funktionsschichten ist eine vorhandene Picosekunden Laserquelle (Lumera Rapid), die bei 1064, 532 und 355nm eingesetzt werden kann. Ein ständiger Vergleich zwischen den wissenschaftlichen Ergebnissen zur Bearbeitungsschwelle und den Versuchen zur technischen Umsetzung (Realisierung von Isolationsgräben mit minimaler Randschädigung) ist von großer Bedeutung in diesem Vorhaben und soll möglichst in getrennten experimentellen Aufbauten verfolgt werden, um den Zeitaufwand bei der Umstellung zu reduzieren. Die Analyse der Oberflächen durch optische Mikroskopie und – in einer Auswahl - REM und AFM, spielt eine entscheidene Rolle bei Ermittlung und Bewertung der relevanten Forschungsergebnisse. Ein wichtiger Beitrag zum Lösungsweg ist eine regelmäßige Vorstellung und Diskussion der Forschungsergebnisse mit Vertretern aus Forschungszentren zur Entwicklung von

Dünnschichttechnologien und Umsetzungspartnern aus der Industrie. Dieser Vorgang schließt den Kreislauf der im Vorhaben geplanten Durchführung zur Erweiterung der Erkenntnistiefe und ggf. Überprüfung der wichtigsten Arbeitsschritte im Vorhaben.

4. Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für kleine und mittlere Unternehmen (kmU)

4.1 Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Die hauptsächliche Nutzung der Ergebnisse und angestrebten Umsetzung einer möglichst Präzisen und Schädigungsarmen Laserbearbeitung (ausgewählter) Funktionsschichten für die Photovoltaik, Displaytechnologie und Mikroelektronik erfolgt in den Fachgebieten **Verfahrenstechnik** und **Produktion**. Voraussetzung ist eine technisch erfolgreiche und marktgerechte Integration von Schlüsseltechnologien (Ultrakurzimpuls-Lasersysteme, optische Scanner, Prozessüberwachungssysteme, etc.) zur Herstellung von beispielsweise Isolationsgräben oder zur Realisierung von komplexeren Mustern. Die Forschungsergebnisse zielen auf die Entwicklung eines Verfahrens, das einen unmittelbaren Nutzen in vielen Wirtschaftszweigen haben kann. Abteilung **Maschinenbau** zur Umsetzung des Verfahrens muss als erstes genannt werden; des Weiteren wird eine Nutzung in den Abteilungen **Feinmechanik** und **Optik** erwartet. Das Fachgebiet **Werkstoffe, Materialien** zieht indirekt einen Nutzen aus den Forschungsergebnissen, da zukünftig eine Abstimmung der Schichtsysteme (Schichtstärke) auch hinsichtlich optimaler Laserbearbeitung denkbar ist.

4.2 Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der kmU

Sonderanlagen und optische Systeme, die in der Entwicklung und Konstruktion ein hohes Maß an Vorleistung und technologisches Risiko darstellen, können die für die geforderte Aufgabenstellungen in der Mikrobearbeitung von Funktionsschichten können besser auf neue Anforderungen konzipiert werden, was einen deutlichen Kostenvorteil darstellt. Des Weiteren gibt es eine Vielzahl von kmU's in Deutschland, die in der Entwicklung, Herstellung, Nachbearbeitung und Endfertigung von Produkten mit Funktionsschichten tätig sind und einen unmittelbaren Nutzen aus den Forschungsergebnissen ziehen können. Die Palette an möglichen Beiträgen zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der kmU's greift aufgrund einer ersten viel versprechenden Verwertungsoptionen in dem sehr breiten Nutzungspotential der Dünnschichttechnologien in eine fast unüberschaubare Anzahl von Bereichen ein.

5. Beabsichtigte Umsetzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Zusätzlich zu den ohnehin bestehenden Verpflichtungen (Erstellung von Zwischen- und Abschlussberichten, Infotreffen mit den Mitgliedern des Industriekonsortiums, etc.) sollen durch z. B. Vorträge bzw. Beiträge zu nationalen und internationalen Konferenzen, Flyer zu den aktuellen Forschungsergebnissen, Beratung und Machbarkeitsstudien, Angebot über Laborbesichtigung und Weiterbildung, Pressemitteilungen, Internetpräsentation und durch die Generierung von Musterexemplaren die Ergebnisse der breiten Öffentlichkeit vorgestellt werden.

6. Durchführende Forschungsstelle

Laser- und Medizin-Technologie GmbH, Berlin

Fabeckstr. 60-62, 14195 Berlin, Germany

Tel: 030-844923-0, Fax: 030-844923-99, email: lasertech@LMTB.de, Internet: www.LMTB.de,

- Leiter der Forschungsstelle Dr. H. Albrecht, Prof. Dr. H.J. Eichler
- Projektleiter Dr. David Ashkenasi, Dipl.-Physiker

Ort, Datum

Unterschrift des Leiters und Stempelabdruck
der Forschungsstelle