

7 Zusammenfassung und Ausblick

Mikromechanische Flächenlichtmodulatoren werden bereits für Projektionsdisplays eingesetzt, wo sie ihre Vorteile gegenüber herkömmlichen Flüssigkristallmodulatoren ausspielen. Der Hauptvorteil liegt in der Modulation höherer Strahlungsleistungen, die eine größere Helligkeit und einen besseren Kontrast des projizierten Bildes ermöglichen. In anderen Anwendungsbereichen, wie der maskenlosen Mikrolithographie und in adaptiven Optiken (z.B. zur Wellenfrontkorrektur) sind bisher nur vereinzelt mikromechanische Lichtmodulatoren eingesetzt worden. Dies liegt hauptsächlich in den höheren Anforderungen solcher Bauelemente gegenüber den zuvor genannten Projektionsmodulatoren begründet. Zu diesen erweiterten Anforderungen zählen zum Beispiel die Modulation von UV-Licht oder die analoge Ansteuerung einzelner Bildelemente. Die bisherigen Entwicklungen mikromechanischer Lichtmodulatoren basieren auf passiv angesteuerten Matrixanordnungen, die eine deutlich geringere Komplexität (Pixelanzahl, Bildwiederholrate) besitzen, als die aktiv angesteuerten Matrizen für die Projektionsanwendungen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Schaltungskonzept vorgestellt, das eine aktive Matrixansteuerung für integrierte, mikromechanische Flächenlichtmodulatoren realisiert. Zu den neuen Eigenschaften dieses Schaltungskonzeptes gehören die analoge Ansteuerung von mikromechanischen Aktoren und die Möglichkeit, auch Licht im UV-Bereich zu modulieren. Diese Eigenschaften erlauben zusammen mit der Flexibilität des entwickelten Konzeptes nun auch einen Einsatz von mikromechanischen Flächenlichtmodulatoren in anderen Anwendungsgebieten als der Displaytechnologie. Zu diesen neuen Anwendungsgebieten gehören die maskenlose Mikrolithographie und adaptive Optiken, zum Beispiel zur Wellenfrontkorrektur.

Zunächst wurde der prinzipielle Aufbau eines Flächenlichtmodulators sowie die Anforderungen in den verschiedenen Anwendungsgebieten dargestellt. Anschließend sind verschiedene Ansteuerkonzepte für mikromechanische Aktoren verglichen worden. Die elektrostatische Ansteuerung mechanischer Aktoren ist dabei am besten für eine vollständige Integration von Aktoren und Ansteuerung geeignet. Der Vergleich von passiven und aktiven Ansteuerkonzepten hat gezeigt, dass nur mit einer aktiven Adressierung die hohen Anforderungen an einen Flächenlichtmodulator zur Mikrolithographie oder zur Wellenfrontkorrektur erfüllt werden können (hohe Pixelanzahl, UV-Licht Modulation, Analogbetrieb).

Die Analogfähigkeit der verwendeten aktiven Matrixadressierung mit dynamischen Pixelelementen wurde anhand von theoretischen Betrachtungen eines Adressiervorganges nachgewiesen. In den analytischen Berechnungen sind neben den parasitären Bauelementen der CMOS-Technologie auch die technologischen Streuungen berücksichtigt worden, so dass die Ergebnisse bezüglich der Ansteuergenauigkeit auch für die Produktentwicklung von mikromechanischen Flächenlichtmodulatoren relevant sind.

Eine wichtiger Parameter der dynamischen Aktoransteuerung ist die Speicherzeit, nach der ein Refresh notwendig ist. Diese Speicherzeit wird maßgeblich von den auf-

tretenden Leckströmen innerhalb der Pixelzelle bestimmt. Die Leckströme können aufgrund von lichtinduzierten Ladungsträgern um mehrere Größenordnungen über dem normalen Maß verpackter integrierter Schaltungen liegen. Zunächst wurden die grundlegenden Vorgänge bei der Lichtabsorption im Halbleiter kurz dargestellt und auf den hier relevanten Fotoeffekt näher eingegangen. Die kritischen Schaltungsknoten in einer dynamischen Pixelzelle, die die Speicherzeit beeinflussen, sind bestimmt worden. Eine detaillierte Analyse der auftretenden Fotoströme zeigte die erreichbare Speicherzeit in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke, der Lichtwellenlänge und dem Pixeldesign. Anhand der Ergebnisse konnten weitere Maßnahmen zur Verminderung der Lichtempfindlichkeit und zur Verbesserung der Speicherzeit dargestellt werden.

Es wurde gezeigt, dass das Konzept einer dynamischen (Pixel-) Speicherzelle geeignet ist, die große Bandbreite an Kennwerten zu erfüllen, die sich aus dem Einsatz eines Flächenlichtmodulators in der Mikrolithographie oder in einem adaptiven, optischen System ergeben. Zu den Kennwerten gehören neben den elektrischen Parametern wie Bildwiederholrate und Adressiergenauigkeit auch weitere physikalische Größen wie die Oberflächenplanarität, an die hohe Anforderungen insbesondere in der hochauflösenden Mikrolithographie zu stellen sind.

Zusammen mit der Integration eines Polier-Prozesses in die verwendete CMOS-Technologie konnte durch Einfügen von zusätzlichen Layoutfiguren die Planarität des Flächenlichtmodulators verbessert werden. Die Erzeugung der Füllfiguren konnte im Rahmen dieser Arbeit automatisiert und in den bestehenden Designflow integriert werden.

Ferner wurde gezeigt, dass mit Hilfe der analogen Ansteuerung der Aktoren eine signifikante Verbesserung der lithografischen Auflösung möglich ist, die in entsprechenden Belichtungssystemen der nächsten Generation zum Einsatz kommen wird. Eine Besonderheit des vorgestellten Konzeptes ist die einfache Skalierbarkeit des Layouts, die anwendungsspezifische Bildfeldgrößen ermöglicht und somit die Entwicklungszeit und die Kosten bei der Erschließung neuer Anwendungsgebiete senkt.

Aufbauend auf dem entwickelten Schaltungskonzept sind Demonstratoren hergestellt worden, mit denen die theoretischen Abschätzungen zur Genauigkeit und Bildrate nachgewiesen worden sind. Diese Bauelemente verfügen über ein einfach zu handhabendes Daten- und Steuerinterface, so dass mit Hilfe eines herkömmlichen PCs die Flächenlichtmodulatoren angesteuert werden können. Auf diese Weise ist die Evaluierung neuer Anwendungsgebiete für mikromechanische Flächenlichtmodulatoren einfach durchzuführen.

Weitere Entwicklungsmöglichkeiten bestehen in der Erhöhung der maximalen Bildwiederholrate. Hier hat sich die Zeitkonstante der Zeilenleitungen aus Polysilizium als begrenzendes Element gezeigt. Die Einführung einer zusätzlichen Metallisierungsebene würde eine weitere Verbesserung bewirken. Die dadurch mögliche zusätzliche Verstärkung der Lichtabschirmung lässt eine Erhöhung der Speicherzeit und somit auch der Ansteuergenauigkeit erwarten.

Aus schaltungstechnischer Sicht wäre die Einführung analoger Stromeingänge sinnvoll, da damit die Begrenzung des Dateninterfaces auf die Schreibgeschwindigkeit der Graustufenansteuerung bei hochauflösenden Belichtungssystemen wegfallen würde. Im Gegensatz zu Spannungseingängen spielt die unvermeidbare Eingangskapazität der Bauelemente dann nur noch eine untergeordnete Rolle für die Datenrate des Interfaces.

