

Integrierte photonische Schaltungen für die Life Sciences

In einer Mehrfarben-Laser-Engine für den sichtbaren Spektralbereich konnten zahlreiche diskrete optische Komponenten durch einen integrierten photonischen Schaltkreis ersetzt werden. Die Basis bildet eine SiN-Wellenleiterplattform.

Jeremy Witzens¹, Patrick Leisching², Alireza T. Mashayekh¹, Thomas Klos², Sina Koch², Florian Merget¹, Douwe Geuzebroek³, Edwin Klein³, Theo Veenstra³, Ronald Dekker³

¹RWTH Aachen University

²Toptica Photonics

³Lionix International

Hochwertige integrierte photonische Schaltungen (Photonic Integrated Circuits, PICs) auf SiN-Basis werden in Mehrfarben-Laser-Engines (MLEs) eingesetzt. Diese dienen als Schlüsselkomponenten in modernen Biophotoniksys-

temen – beispielweise in der konfokalen Fluoreszenzmikroskopie, einschließlich der Stimulated-Emission-Depletion (STED)-Mikroskopie, der Durchflusszytometrie, der Optogenetik, der Genanalyse und der DNS-Sequenzierung. Diese haben eine selektive optische Anregung von Molekülen, Fluorophoren und – im Fall der Optogenetik – ligandengesteuerten Ionenkanälen durch Laserstrahlung innerhalb ihres Absorptionsspektrums gemeinsam. Die eindeutige Identifizierung von Molekülen oder zellularen Strukturen erfordert oft die gleichzeitige Analyse der Fluoreszenzsi-

gnale mehrerer Fluoreszenzmarker, weshalb von MLEs mehrere Anregungswellenlängen für kommerziell verfügbare biokompatible Fluoreszenzmarker verlangt werden.

Neben den benötigten Wellenlängen gibt es dabei eine ganze Reihe von weiteren Anforderungen an MLEs [1]: Variable Abschwächung und digitale Intensitätsmodulation im Hertz- bis Kilohertzbereich sind für viele Anwendungen wie Optical Trapping, Lebensdauerbildgebung, oder Fluorescence Recovery After Photobleaching (FRAP) notwendig. Außerdem lässt sich das Schalten des Laser-

Fazit

Während bereits eine beträchtliche Anzahl von Arbeiten zur Nutzung von PIC-Technologie für günstige Lab-on-a-Chip-Anwendungen existiert, wird hier auf den Einsatz von PICs im sichtbaren Wellenlängenbereich in hochwertigen Geräten abgezielt. Es wurden Messungen der Kernfunktionen auf Chip- und Systemebene gezeigt, die für eine Mehrfarben-Laser-Engine, basierend auf einem PIC, notwendig sind. Der Chip wurde auf der Triplex-Silizium-Nitrid-Technologie im Rahmen der Pix4life-Pilotlinie realisiert und die Schichtdicken für sichtbare Wellenlängen in den Life Sciences optimiert. Der vorgestellte Chip vereinigt variable Abschwächer und Multiplexer für vier Wellenlängen, die das komplette sichtbare Spektrum (405 nm, 488 nm, 561 nm, 640 nm) abdecken und dabei insgesamt für die drei Wellenlängen 488 nm, 561 nm, 640 nm nur geringe Einfügedämpfungen aufweisen (~5 dB auf der Chipebene, ~6,5 dB im System). Verbesserungspotenzial gibt es bei der Einfügedämpfung und der Lebensdauer der 405-nm-Schnittstellen. Im nächsten Schritt wird nach dem Aufbau des ersten Demonstrators der Fokus auf der Verifikation und Gewährleistung der Langzeitstabilität des Gesamtsystems liegen. Um noch stärker von der Integration von PICs profitieren zu können, soll eine weitere Version mittels Strahlformung im PIC eine direkte Freistrahkopplung an ein Durchflusszytometer ermöglichen.

lichts zwischen zwei Fasern nutzen, um zwischen Scanning-Konfokalmikroskopie und Weitwinkelbeleuchtung umzuschalten, wie es beispielsweise für konventionelle Fluoreszenzbildgebung angewendet wird.

Aufbauend auf diskreten optischen Komponenten benötigen MLEs oft teure Bauteile, beispielsweise akustooptische durchstimmbare Filter (AOTFs) und Faserschalter. Darüber hinaus ist eine Gewährleistung der Langzeitstabilität der optischen Komponenten zugleich technische Herausforderung und Kostentreiber. Zusätzlich zur Reduzierung der Materialkosten und der Anzahl der Bauelemente schafft die Miniaturisierung der MLEs dank der Vorteile der SiN-PICs neue Möglichkeiten für die gesamte Systemarchitektur: Anstelle einer Faserkopplung an das Instrument wäre es praktikabel, die miniaturisierte MLE direkt in ein verkleinertes Gesamtsystem ohne zwischengeschaltete Faser zu integrieren. Damit ergibt sich weiteres Potenzial für Innovationen, da nun eine direkte Strahlumformung des Lichts im PIC für die Freistrahkopplung zum Instrument möglich wird.

Weitere Miniaturisierung kann, sofern möglich, durch Ersetzen der diodengepumpten Festkörperlaser (DPSS) mit Halbleiterlasern erzielt werden. Obwohl dieser Schritt eine direkte Lasermodulation erlauben würde, wird der Bedarf einer externen Modulation und Abschwächung nicht vollständig ausgeräumt, da

Laserdioden bei sehr niedrigen Leistungen zu deutlich verstärktem Rauschen neigen. Die Abschwächung der Laserstrahlung innerhalb des PICs erweitert den Dynamikbereich so, dass die Laserdioden nicht in der Nähe des Schwellstroms betrieben werden müssen, und daher effektiv eine verbesserte Rauscheigenschaft über den gesamten Leistungsbereich aufweisen.

PIC-Plattform

Im Rahmen des Projekts Pix4life, das von der Europäischen Union zur Unterstützung des wachsenden Anwendungsbereichs von SiN-basierten PICs im Bereich sichtbarer Wellenlängen für die Life Sciences gegründet wurde, haben Lionix International und Belgiens interakademisches Zentrum für Mikroelektronik (imec) jeweils die Fähigkeiten der SiN-Triplex- und der Biopix-Plattformen in den sichtbaren Wellenlängenbereich erweitert. Dank des vollständig offenen Zugangs zur Multi-Projekt-Wafer-Herstellung (MPW) ab 2020 werden diese Plattformen einen geeigneten und kosteneffektiven Einstieg in die PIC-Technologie ermöglichen.

Die Untersuchungen dieser Arbeit wurden mit der Triplex-Plattform realisiert. Die gegenwärtig erhältliche Plattform für sichtbare Wellenlängen basiert auf Low-Confinement-Wellenleitern, hergestellt durch vollständige Ätzung eines stöchiometrischen Si₃N₄-Films, der mittels Low Pressure Vapor Deposition (LPCVD) auf einen oxidierten Siliziumwafer aufgetragen und anschließend mit einer SiO₂-Schicht überzogen wurde (Single-Stripe-Geometrie). Das Materialsystem besitzt einen breiten Transparenzbereich von 400 nm bis 2,35 µm, der durch Absorption von SiO₂ hin zu größeren >

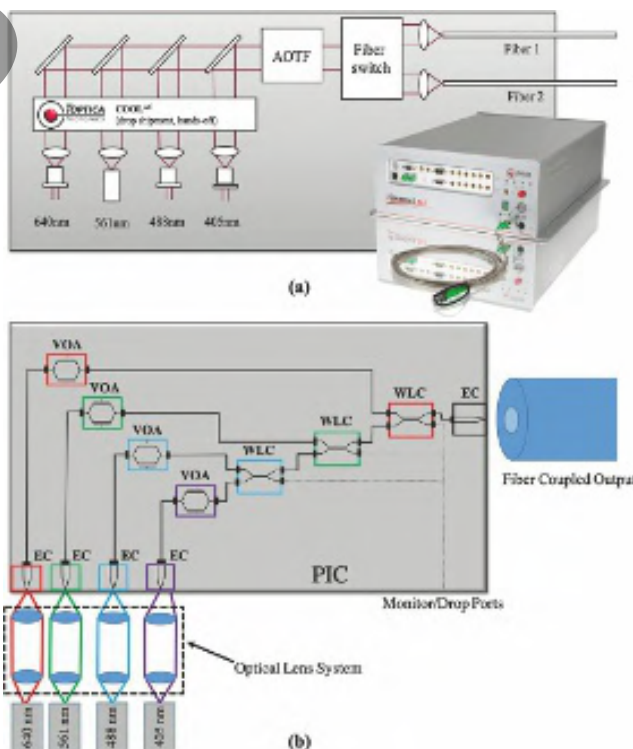


Bild 1: (a) kommerziell verfügbare MLE basierend auf diskreten Komponenten und (b) SiN-PIC, der die Schlüsselfunktionen vereint. On-Chip-Geräte sind aufgebaut mit Kantenkopplern (EC), variablen optischen Abschwächern (VOA) und Wellenlängenmultiplexern (WLCs).