

Halbleitertechnologie von A bis Z

Verbindungshalbleiter

InP-basierte Photonik-Bauelemente	3
<i>Warum Indiumphosphid für die Photonik?</i>	3
<i>Laserdioden und Elektroabsorptionsmodulatoren</i>	3
<i>Photonische integrierte Schaltungen (PICs)</i>	4

InP-basierte Photonik-Bauelemente

Warum Indiumphosphid für die Photonik?

Indiumphosphid (InP) besitzt eine direkte Bandlücke von etwa 1,35 eV, was einer Grenzwellenlänge von rund 920 nm entspricht, und eignet sich damit unmittelbar zur Lichterzeugung und -detektion, im Gegensatz zu Silicium, dessen indirekte Bandlücke eine effiziente Lichtemission verhindert. Durch die gezielte Kombination mit den ternären und quaternären Mischkristallen InGaAs (Bandlücke bei gitterangepasster Zusammensetzung $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ etwa 0,75 eV) und InGaAsP, die mit der InP-Gitterkonstante von 5,869 Å gitterangepasst aufgewachsen werden können, lässt sich die Bandlücke und damit die Emissions- beziehungsweise Absorptionswellenlänge über einen weiten Bereich von etwa 0,92 bis 1,65 µm einstellen.

Von besonderer Bedeutung ist dabei die Abdeckung der beiden zentralen Telekommunikationsfenster bei 1,3 µm (minimale chromatische Dispersion in Standard-Singlemode-Fasern) und 1,55 µm (minimale Dämpfung von etwa 0,2 dB/km in Glasfasern). Die Gitteranpassung zwischen InP und den quaternären InGaAsP-Schichten mit einer Fehlanpassung von deutlich unter 0,1 % stellt sicher, dass die Epitaxieschichten nahezu defektfrei aufwachsen, was für die Lebensdauer der Bauelemente entscheidend ist.

Laserdioden und Elektroabsorptionsmodulatoren

Für die optische Datenübertragung werden auf InP überwiegend Laser mit verteilter Rückkopplung (Distributed Feedback Laser, DFB-Laser) eingesetzt, bei denen ein periodisches Gitter im Wellenleiter longitudinal nur eine einzige Resonatormode selektiert und so eine sehr schmale, stabile Emissionslinie mit typischen Linienbreiten von unter 1 MHz erzeugt. Für hohe Datenraten wird der Laser häufig mit einem separaten Elektroabsorptionsmodulator (EAM) kombiniert, dessen Absorptionskante sich durch eine angelegte Sperrspannung über den Franz-Keldysh-Effekt oder den quantenbeschränkten Stark-Effekt verschiebt.

Die monolithische Integration von DFB-Laser und Modulator auf einem gemeinsamen InP-Chip wird als Electro-absorption Modulated Laser (EML) bezeichnet und vermeidet die Kopplungsverluste einer externen Faser-zu-Chip-Verbindung zwischen zwei getrennten Bauelementen. Kommerzielle EMLs erreichen elektrische Modulationsbandbreiten von 25 bis über 40 GHz und unterstützen damit direkte Datenraten von 40 bis 100 Gbit/s pro Wellenlängenkanal, deutlich mehr als mit direkt modulierten Lasern erreichbar,

deren Bandbreite meist auf wenige zehn Gigahertz begrenzt bleibt.

Photonische integrierte Schaltungen (PICs)

InP ist neben Silicium das wichtigste Materialsystem für photonische integrierte Schaltungen (Photonic Integrated Circuits, PICs), da es im Gegensatz zu Silicium sowohl aktive Bauelemente wie Laser und Verstärker als auch passive Wellenleiterstrukturen und Photodetektoren monolithisch auf demselben Substrat vereint. Eine typische InP-PIC kombiniert mehrere DFB-Laser unterschiedlicher Wellenlänge, Modulatoren, Wellenleiter-Multiplexer und Photodioden auf einem einzigen Chip; kommerzielle Großintegrations-PICs für optische Transportnetze vereinen heute mehrere hundert einzelne photonische Funktionselemente auf einem Chip von wenigen Quadratmillimetern und ersetzen so eine Vielzahl diskret gefertigter und aufwendig justierter Einzelkomponenten.

Im Vergleich zur Siliciumphotonik, die von der ausgereiften, hochvolumigen CMOS-Fertigungsinfrastruktur mit Wafergrößen bis 300 mm profitiert, aber für die Lichterzeugung auf hybride oder heterogen integrierte III-V-Materialien angewiesen ist, bietet InP die native Möglichkeit, Licht direkt im selben Material zu erzeugen – allerdings meist auf deutlich kleineren, 2- bis 4-Zoll-InP-Wafern und entsprechend höheren Herstellungskosten pro Chipfläche. Dies vereinfacht den Fertigungsablauf für rein photonische Anwendungen, während Siliciumphotonik ihre Stärke vor allem in der Kombination mit bestehender CMOS-Elektronik und der Skalierbarkeit großer Waferformate ausspielt.