

Projekt-Abschlussbericht

Wachstums-kern Berlin WideBaSe

Verbundprojekt 1: Leistungs-LEDs 300 – 350 nm

Teilprojekt C: Entwicklung von Epitaxieprozessen und Prozessierungsschritten für Leistungs-LEDs 300 – 350 nm

Projekttitel:

Entwicklung von Epitaxieprozessen und Prozessierungsschritten für Leistungs-LEDs 300 – 350 nm

Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Bildung und Forschung	
Förderkennzeichen:	03WKBT01C	
Projektlaufzeit:	01.07.2010 bis 31.06.2013	
Berichtszeitraum:	01.07.2010 - 31.06.2013	

Freigabe:

Projektleitung:	Dr. M. Weyers
Institutsleiter:	Prof. Dr. G. Tränkle

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Teil I: Kurzdarstellung

I.1. Aufgabenstellung

Im Rahmen des Verbundvorhabens waren UV-LEDs bei 350 nm und 310 nm zu entwickeln. Auf Grund der Entwicklung auf dem Markt der Drucktechnik (Anpassung der Lacke an die kommerziell verfügbaren Wellenlängen oberhalb von 385 nm), auf den die Wellenlänge 350 nm ursprünglich zielte, und die besseren Marktaussichten im UV-B um 300 nm wurde die Entwicklung im Projektverlauf auf 310 nm fokussiert. Schwerpunkte der Arbeiten des FBH lagen bei der Entwicklung und Optimierung der AlN-Epitaxietechnologie für die Basisschichten, der AlGaIn-Epitaxietechnologie für Quantengraben sowie der kompletten Chip-Technologie bis hin zur Erstellung von Flip-Chip-Aufbauten für die Charakterisierung im CW-Betrieb und erste Alterungsuntersuchungen.

I.2. Voraussetzungen zur Vorhabensdurchführung

Die Arbeiten des FBH konnten auf eine mehrjährige Entwicklung der GaN-Technologie für Laserdioden mit Wellenlängen von 400 – 450 nm, UV-Leuchtdioden und Transistoren aufbauen. Vorarbeiten zu UV-B-LEDs wurden im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundvorhabens „Deep-UV-LEDs“ geleistet. Die zur Vorhabensbearbeitung nötigen Epitaxie- und Prozessanlagen für UV-LEDs waren vorhanden. Die konkreten Teilprozessschritte mussten an die besonderen Anforderungen der Bauelemente mit hohen Al-Anteilen angepasst werden. Weiterhin konnte die am FBH verfügbare Materialanalytik, wie Röntgendiffraktometrie und Elektronenmikroskopie und die dafür nötigen Präparationstechniken genutzt werden.

I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Für die Projektplanung und -koordination erfolgte zunächst ein intensiver Wissensaustausch mit den Projektpartnern OSA, LayTec und der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. M. Kneissl der TU Berlin. Mit den letzten beiden Partnern bestand bereits vor dem Vorhaben eine langjährige Kooperation. Auf dem Feld der UV-LEDs bilden FBH und TUB ein integriertes Team mit intensiver Arbeitsteilung. Schwerpunkt der Arbeiten am FBH waren dabei die Herstellung der AlN-Basisschichten sowie der komplette Bauelementprozess einschließlich Montage auf Submount und Alterungsuntersuchungen an montierten Bauelementen, Schwerpunkt an der TUB waren das Design der Vertikal- und Lateralstrukturen, die Simulation der Bauelemente und die on-wafer-Messtechnik. Beide Partner waren auf dem Gebiet der Epitaxie von kompletten Bauelementstrukturen aktiv, wobei hier der Schwerpunkt an der TUB lag. Mit LayTec wurden die Ergebnisse der ständig bei den Epitaxieprozessen mitlaufenden in-situ-Analytik diskutiert und Verbesserungen der Messtechnik getestet. An OSA wurden LED-Prototypen zur Entwicklung der Aufbautechnik geliefert. Die erzielten Ergebnisse wurden sowohl mit den direkt beteiligten Projektpartnern diskutiert als auch das weitere Vorgehen bei regelmäßigen Projekttreffen mit allen Projektpartnern abgestimmt.

I.4. Wissenschaftlich-technischer Ausgangsstand

Für den UV-B-Bereich bei Wellenlängen um 300 nm gab es zu Projektbeginn keine ausreichend zuverlässigen kommerziell erhältlichen Bauelemente. Es agierte vornehmlich die Firma SETi am Markt, die jedoch nur begrenzt lieferfähig war. Die damals angebotenen Chips waren für den Bereich niedriger Leistungen und Betriebsströme unter 20 mA ausgelegt. Leistungschips für hohe Ströme und hohe Verlustleistung waren nicht im Angebot. Im Rahmen der gemeinsamen Entwicklungen mit der TUB gab es zu Projektbeginn UV-B-LEDs bei verschiedenen Wellenlängen, die jedoch noch nicht die für Anwendungen nöti-

gen Ausgangsleistungen aufwiesen. Untersuchungen zur Alterung lagen ebenfalls noch nicht vor.

Im UV-A konzentrierten sich die Entwicklungen vornehmlich auf den Bereich um 385 nm, bei dem GaN noch transparent ist und daher keine AlGaIn-Pufferschichten mit dem daraus resultierenden Problem der deutlich höheren Defektdichte nötig sind. Diese Entwicklungen wurden von den meisten Firmen, die sich mit weißen LEDs beschäftigten, vorangetrieben, da sie Basis für den Ansatz der Anregung von drei Phosphoren durch UV-Licht zur Erzeugung von weißem Licht ist. Allerdings wurde dieser Ansatz in der Folge zu Gunsten von Pumpen von zwei Phosphoren und Mischung mit dem blauen Primärlicht bei 450 nm verworfen. Bei kürzeren Wellenlängen um 350 nm konnte das FhIAF Effizienzen im Bereich von 5% demonstrieren, wobei ein spezieller Wachstumsstart mit GaN-Keimen, die dann mit AlGaIn überwachsen werden, eingesetzt wurde, der nicht auf kürzere Wellenlängen übertragbar zu sein schien.

I.5. Zusammenarbeit

Wie bereits bei der Projektplanung vorgesehen, erfolgte die Bearbeitung in enger Abstimmung mit den Projektpartnern. Insbesondere mit der TUB wurde dabei eine gemeinsame Prozesskette für UV-B-LEDs etabliert. Darüber hinaus wurde in der Anfangsphase das Palo Alto Research Lab (PARC) mit einbezogen, wo auf vom FBH und der TUB bereitgestellten Unterlagen aktive LED-Strukturen realisiert wurden.

Teil II: Eingehende Darstellung

II.1. Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses

Aus der Zuwendung wurden die an der Herstellung und Optimierung der UV-LEDs beteiligten MitarbeiterInnen sowie die nötigen Verbrauchsmittel anteilig bezahlt.

Die angestrebten Ziele wurden für die LEDs bei 310 nm alle erreicht. Die erarbeiteten Epitaxie und Strukturierungsprozesse werden in weiteren Projekten des FBH genutzt und stehen für die Einwerbung zukünftiger Projekte zu UV-LEDs zur Verfügung. Sie bilden den Ausgangspunkt für weitere Entwicklungen in Richtung auf eine Kommerzialisierung im Rahmen des EXIST-Vorhabens „UV Berlin“. Sie sollen die Basis bilden für Systementwicklungen durch Partner im Rahmen des Projekts „Advanced UV for Life“.

II.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Aus der Zuwendung wurden sowohl Personalkosten als auch die für die Herstellung der LEDs nötigen Substrate und Betriebsmittel sowie Submounts etc. bezahlt. Investitionen wurden nicht getätigt.

II.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten waren für die Prototypenentwicklung der UV-LEDs mit den geforderten Projektzielen notwendig. Sie waren angemessen, allerdings lagen die Kosten deutlich über dem geplanten Projektbudget, was eine anteilige Finanzierung aus der Grundfinanzierung erforderte.

II.4. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Projekt entstandenen Prototypen der UV-LEDs im Wellenlängenbereich um 300 nm sollen vom Projektpartner OSA genutzt werden, um Kunden zu finden und auf der Basis der dabei eruierten Zielspezifikationen weitere gezielte Entwicklungsarbeiten anzustoßen. Um die umfangreichen Entwicklungen so weiter zu vervollständigen, dass eine Produktentwicklung und damit eine Bedienung des Markts für UV-B-LEDs möglich wird, wurde der Antrag „UV Berlin“ auf Förderung im Rahmen des EXIST-Programms gestellt. Das FBH nutzt die Ergebnisse des Vorhabens damit zur Einwerbung neuer Projekte und zur Steigerung der wissenschaftlichen Reputation. Die erarbeiteten Epitaxie und Strukturierungsprozesse werden in weiteren Projekten des FBH genutzt wie z.B. bei der Entwicklung von solarblinden UV-Photodetektoren. Der Projektpartner LayTec nutzt die im Projekt entstandenen Ergebnisse zur weiteren Verbesserung der in-situ-Analytik.

II.5. Fortschritt bei anderen Stellen

Die Firma Showa Denko (Japan) liefert LEDs im UV-A Spektralbereich für kleine Ströme bis 20 mA, wobei die Preispolitik dieses Anbieters keine Anpassung des Verwertungsplanes erforderlich macht. Das IAF in Freiburg hat im Rahmen des BMBF-Forscherverbundes „Deep UV LEDs“ LEDs mit einer Emission bei 355 nm entwickelt, die bei 20 mA eine optische Leistung von 4 mW zeigen. Die Firma Nitride Semiconductors (Japan) bietet kleine (20mA) und mittlere (100 mA) Chips im Wellenlängenbereich 355-380 nm an, die recht gute Effizienzen im Bereich 365 nm aufweisen (100 mW - 150 mW Strahlungsleistung bei 350 mA) und bei denen eine sehr gute Verarbeitbarkeit mit konventioneller Verarbeitungstechnik möglich ist. Auf Grund der kommerziellen Verfügbarkeit von Chips im UV-A-Bereich und der sich dort gleichzeitig verschlechternden Marktchancen durch Nutzung von Wellenlängen oberhalb 385 nm für Anwendungen in der Druckindustrie wurde der Fokus der Entwicklungsarbeiten auf die Zielwellenlängen < 320 nm im UV-B gelegt.

Nach verschiedenen Quellen und aus der Analyse von Mustern zeichnet sich ab, dass die Fa. SETi sich vor allem auf die Vereinfachung der Montagetechnik und die Verbesserung der Lebensdauereigenschaften konzentriert. Durch die Verwendung von transparenten, p-dotierten AlGaN Schichten ist es der Firma SETi gelungen eine 278 nm LED mit 9,8 mW (bei 20 mA) und einer externen Quanteneffizienz von 11% zu realisieren. Trotz dieser von SETi erzielten Ergebnisse ist die angegebene Spezifikation der von der Firma verkauften LEDs deutlich niedriger. Außerdem fällt im hier bearbeiteten Wellenlängenbereich > 280 nm im Vergleich zu 270 nm – 280 nm die Effizienz deutlich ab (siehe auch Abb. 5). Die in der Kooperation von TU Berlin und FBH erreichten externen Quanteneffizienzen liegen zum Teil deutlich über den Ergebnissen von SETi. Obwohl SETi schon länger im Bereich der UV-LEDs aktiv ist und zu Projektbeginn einen klaren Vorsprung in Bezug auf höhere Ausgangsleistungen hatte, konnten zum Ende des Projekts im anvisierten Wellenlängenbereich höhere Ausgangsleistungen seitens TU Berlin und FBH erreicht werden.

II.6. Veröffentlichung der Ergebnisse

Während der Projektlaufzeit wurde eine Patentfamilie angemeldet. Das Prüfungsverfahren ist noch nicht abgeschlossen. Die wissenschaftlichen Ergebnisse zu den UV-LEDs wurden in referierten Fachzeitschriften und bei internationalen Konferenzen veröffentlicht.

Patentanmeldung

1. DE 10 2012 223 986.3 / PAT12-FBH 108
„Template für laterales Überwachsen mindestens einer Gruppe-III-Nitrid-basierten Schicht“

Veröffentlichungen in referierten Zeitschriften:

1. V. Kueller, A. Knauer, F. Brunner, A. Mogilatenko, M. Kneissl, and M. Weyers
"Investigation of inversion domain formation in AlN grown on sapphire by MOVPE"
phys. stat. sol. (c), vol. 9, no. 3-4, pp. 496-498 (2012).
2. V. Kueller, A. Knauer, C. Reich, A. Mogilatenko, M. Weyers, J. Stellmach, T. Wernicke, M. Kneissl, Z. Yang, C.L. Chua, and N.M. Johnson
"Modulated Epitaxial Lateral Overgrowth of AlN for Efficient UV LEDs"
IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 24, no. 18, pp. 1603-1605 (2012).
3. A. Knauer, V. Kueller, U. Zeimer, M. Weyers, C. Reich, and M. Kneissl
"AlGaIn layer structures for deep UV emitters on laterally overgrown AlN/sapphire templates"
phys. stat. sol. (a), vol. 210, no. 3, pp. 451-454 (2013).
4. V. Kueller, A. Knauer, U. Zeimer, M. Kneissl, M. Weyers
"Controlled coalescence of MOVPE grown AlN during lateral overgrowth"
J. Cryst. Growth, vol. 368, pp. 83-86 (2013).
5. F. Brunner, A. Mogilatenko, V. Kueller, A. Knauer, M. Weyers
"Stress evolution during Al_xGa_{1-x}N/AlN growth on sapphire"
J. Cryst. Growth, vol. 376, pp. 54-58 (2013).
6. U. Zeimer, V. Kueller, A. Knauer, A. Mogilatenko, M. Weyers, M. Kneissl
"High quality AlGaIn grown on ELOAlN/sapphire templates"
J. Cryst. Growth, vol. 377, pp. 32-36 (2013).
7. T. Kolbe, F. Mehnke, M. Guttman, C. Kuhn, J. Rass, T. Wernicke, and M. Kneissl, U. Zeimer, J. Grenzer, and M. Weyers
"Improved injection efficiency in 290nm light emitting diodes with Al(Ga)N electron blocking heterostructure"
Appl. Phys. Lett., vol. 103, no. 031109 (2013).
8. M. Lapeyrade, A. Muhin, S. Einfeldt, U. Zeimer, A. Mogilatenko, M. Weyers and M. Kneissl
"Electrical properties and microstructure of vanadium-based contacts on ICP plasma etched n-type AlGaIn:Si and GaN:Si surfaces"
Semicond. Sci. Technol., vol. 28, no. 125015 (2013).
9. N.L. Ploch, S. Einfeldt, M. Frentrup, J. Rass, T. Wernicke, A. Knauer, V. Kueller, M. Weyers and M. Kneissl
"Investigation of the temperature dependent efficiency droop in UV LEDs"
Semicond. Sci. Technol., vol. 28, no. 125021 (2013).

10. C. Reich, M. Feneberg, V. Kueller, A. Knauer, T. Wernicke, J. Schlegel, M. Frentrup, R. Goldhahn, M. Weyers, and M. Kneissl
"Excitonic recombination in epitaxial lateral overgrown AlN on sapphire"
Appl. Phys. Lett., vol. 103, no. 212108 (2013).
11. F. Mehnke, T. Wernicke, H. Pingel, C. Kuhn, C. Reich, V. Kueller, A. Knauer, M. Lapeyrade, M. Weyers, and M. Kneissl
"Highly conductive n-Al_xGa_{1-x}N layers with aluminum mole fractions above 80%"
Appl. Phys. Lett., vol. 103, no. 212109 (2013).
12. U. Zeimer, A. Mogilatenko, V. Kueller, A. Knauer and M. Weyers
"Cathodoluminescence and TEM investigations of structural and optical properties of AlGa_N on epitaxial laterally overgrown AlN/sapphire templates"
J. Phys. Conf. Ser., vol. 471, no. 012021 (2013).
13. A. Knauer, V. Kueller, U. Zeimer, M. Weyers
"MOVPE growth of Al_xGa_{1-x}N with x ~ 0.5 on epitaxial laterally overgrown AlN / sapphire templates for UV-LEDs"
phys. stat. sol. (c) 201300415 early view (ICNS-10, 28-Nov-2013)

Sonstige Veröffentlichungen

14. T. Kolbe, A. Knauer, J. Stellmach, C. Chua, Z. Yang, S. Einfeldt, P. Vogt, N.M. Johnson, M. Weyers and Michael Kneissl
"Optical polarization of UV-A and UV-B (In)(Al)Ga_N multiple quantum well light emitting diodes"
Proc. SPIE, vol. 7939, no. 79391G (2011).

Fachlicher Bericht "Entwicklung von Epitaxieprozessen und Prozessierungsschritten für Leistungs-LEDs 300 – 350 nm"

Zeitraum 01.07.2010 - 31.06.2013

A. Knauer, V. Küller, S. Einfeldt

Die Arbeiten am FBH wurden in enger Kooperation mit denen der anderen Partner durchgeführt. Es wurden mit der TUB Epitaxiestrukturen (primär für 310 nm) und laterale Chipdesigns abgestimmt. Die Aufgaben in der Epitaxie wurden entsprechend der technischen Randbedingungen von FBH und TUB gemeinsam bearbeitet. Mit OSA wurde die Montage Chip auf Submount (am FBH) und Submount in Gehäuse (OSA) abgestimmt. Die Analytik-Tools von LayTec werden routinemäßig zur Gewinnung von Prozess- und Materialdaten bei der Epitaxie der AlGaInN-Strukturen eingesetzt.

AP 1.1.3.1 und AP 1.1.7.1 - Pufferschichten

Als Basis aller abgeschiedenen Schichtstrukturen werden für die Emissionswellenlänge der LEDs transparente Pufferschichten benötigt. Deren Versetzungsdichte muss hinreichend gering sein ($<10^9 \text{ cm}^{-2}$), damit nicht über nichtstrahlende Rekombination der Ladungsträger an diesen Versetzungen die Effizienz der LEDs für eine kommerzielle Verwertung zu gering wird. Als Trägermaterial (Substrat) wurde transparentes, kostengünstiges Saphir verwendet. Mögliche transparente Pufferschichten sind AlGaIn-Schichten mit einem Al-Gehalt von größer $\sim 40\%$. Durch die stark unterschiedlichen Gitterkonstanten und thermischen Ausdehnungskoeffizienten des AlGaIn und des Saphirs kommt es gewöhnlich bei der Abscheidung von AlGaIn auf Saphir zu hohen Versetzungsdichten von einigen 10^{10} cm^{-2} . Eine wichtige Teilaufgabe war daher die Entwicklung von Technologien zur Reduktion der Versetzungsdichte in AlGaIn. Es wurde der Einfluss der Reaktorkonditionierung sowie der thermischen Vorbehandlung, der Vorbelegung der Saphiroberfläche sowie der Gegenwart von Sauerstoff vor der Nukleation von AlN auf dem Saphir in einer Multiwaferanlage untersucht. Es wurden AlN-Basissschichten auf Saphir mit Versetzungsdichten um 10^{10} cm^{-2} über den gesamten Berichtszeitraum für die LED Entwicklung bereitgestellt.

Da AlN auf Saphir zugverspannt wächst, beträgt die kritische Schichtdicke ca. $1 \mu\text{m}$ bevor Rissbildung auftritt. Um die geforderten Versetzungsdichten durch Versetzungsannihilation mit zunehmender Schichtdicke zu erreichen, werden Dicken von mindestens $5 \mu\text{m}$ benötigt. Daher wurde das laterale Überwachsen von streifenförmig strukturierten AlN-Schichten mit AlN (ELO-AlN) als Methode zur Versetzungsreduktion zur Technologie entwickelt. Es gelang die Versetzungsdichte im AlN auf diese Weise partiell auf $< 1 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ zu senken (Abb. 1). Nachteil der Methode ist eine inhomogene Verteilung der Versetzungsdichte über den strukturierten Streifen, die stärkere Verkrümmung der AlN-Templates durch die höhere Schichtdicke von $>5 \mu\text{m}$ sowie der hohe technologische Aufwand in der Herstellung (zwei Epitaxien und Strukturierung).

Als zweite Technologie wurde daher beim Partner TUB eine Versetzungsreduktion auf ca. $5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ in auf den planaren AlN/Saphir-Templates abgeschiedenen AlGaIn-Puffern entwickelt. Hier gelingt die Versetzungsannihilation mit zunehmender Schichtdicke ohne Rissbildung. Um die AlGaIn-Gitterkonstante und relaxierte Schichten zu erreichen, wurde auf dem Template ein spannungsrelaxierendes Supergitter abgeschieden.

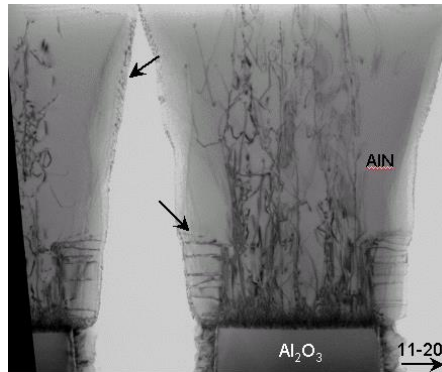


Abb. 1 TEM Aufnahme vom Querschnitt eines ELO-AlN/Saphir Templates. Die dunklen Linien sind Versetzungen, deren Dichte zur Oberfläche auf $< 3 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ absinkt.

Eine Reduktion der Versetzungsdichte in den AlGa_xN-Schichten ist auch nötig zur Erzielung eines geringen Schichtwiderstandes der n-AlGa_xN Kontaktschicht sowie zu einer erhöhten Reproduzierbarkeit des Schichtwiderstandes bei optimiertem Disilan-Angebot (Abb. 2). So beträgt der spezifische Widerstand z.B. für n-Al_{0,4}Ga_{0,6}N 0,01 Ωcm bzw. 0,02 Ωcm für n-Al_{0,6}Ga_{0,4}N.

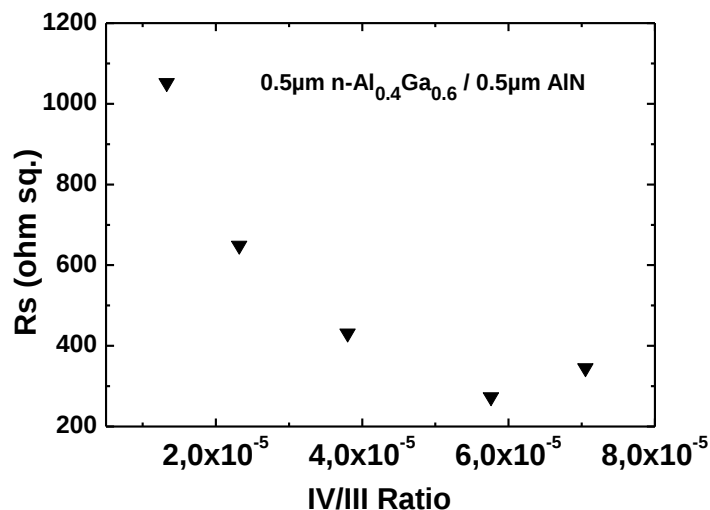


Abb. 2 Schichtwiderstand ca. 0.5 µm dicker Al_xGa_{1-x}N-Schichten (transparent für 300 nm) vs. IV / III Verhältnis

Die n-AlGa_xN Schichten weisen größere Gitterkonstanten als AlN auf. Dies führt neben dem Unterschied in der thermischen Ausdehnung der Schichten und des Saphirs zu Druckspannungen im AlGa_xN. Dadurch kam es teilweise zum Abscheren der Epitaxialschichten vom strukturierten Saphir-Substrat. Um dies zu verhindern, wurde das Flächenverhältnis der Stege, auf denen die Schicht haftet, zu den Gräben vergrößert. Zusätzlich wurden verschiedene Geometrien im strukturierten Saphir mit AlN überwachsen und deren Haftfestigkeit mit LED-Schichtstrukturen getestet, die anschließend erfolgreich zu LEDs prozessiert und vereinzelt wurden. Dabei konnte bisher keine eindeutige Präferenz für eines der Muster festgestellt werden. Die in diesem Bericht dargestellten Bauelementdaten beruhen daher alle entweder auf planaren AlN-Templates oder auf ELO-Templates mit einfacher Streifengeometrie.

Somit gelang es, die für UV-B LEDs notwendige geringe Versetzungsdichte in den für UV-Licht transparenten AlN/Saphir Templates bzw. den AlGa_xN-Pufferschichten zu erzielen und die UV-B LED-Entwicklung damit überhaupt erst möglich zu machen. Im Rahmen des

Vorhabens sind AlN/Saphir-Templates für die Entwicklung des ELO-Prozesses, zur Abscheidung von Einzelschichten sowie kompletter Bauelementstrukturen sowohl am FBH als auch beim Partner TUB in erheblichem Umfang bereitgestellt worden.

Arbeitspaket 1.1.5 – In-situ-Analytik

Die in-situ Reflexionsmessung wird routinemäßig genutzt zur Wachstumsratenbestimmung. Sie ermöglicht den Kolaeszenzzeitpunkt beim Überwachen von strukturier-tem AlN mit AlN zu bestimmen und die Oberflächenmorphologie zu kontrollieren. Die Messungen wurden im Rahmen des Vorhabens vom 2-Wellenlängen-Modul (405 und 950 nm) auf ein 3-Wellenlängen-Modul umgestellt. Die zusätzliche Reflexionsmessung bei 633 nm ermöglicht die Verfolgung der Wachstumsrate auch für dickere Schichten, bei denen die Reflexion bei 405 nm bereits ausdämpft.

Die Krümmungsmessungen werden benutzt, um den Zeitpunkt des Reißens der stark zugverspannten AlN und n-AlGaIn Schichten zu bestimmen. Mittels des EpiTT-Sensors wird die Temperatur der Satelliten bestimmt und entsprechend nachgeführt, da die AlGaIn-Schichtzusammensetzung stark durch die Ga-Desorption und somit die Temperatur beeinflusst wird. Die Daten wurden LayTec übermittelt. Das von LayTec neu entwickelte Modul zur Messung der Krümmung mit höherer Auflösung und der Reflektivität bei drei Wellenlängen wurde an der Mehrscheibenanlage des FBH in Betrieb genommen sowie ein EpiCurve TT SP getestet (siehe Bericht LayTec).

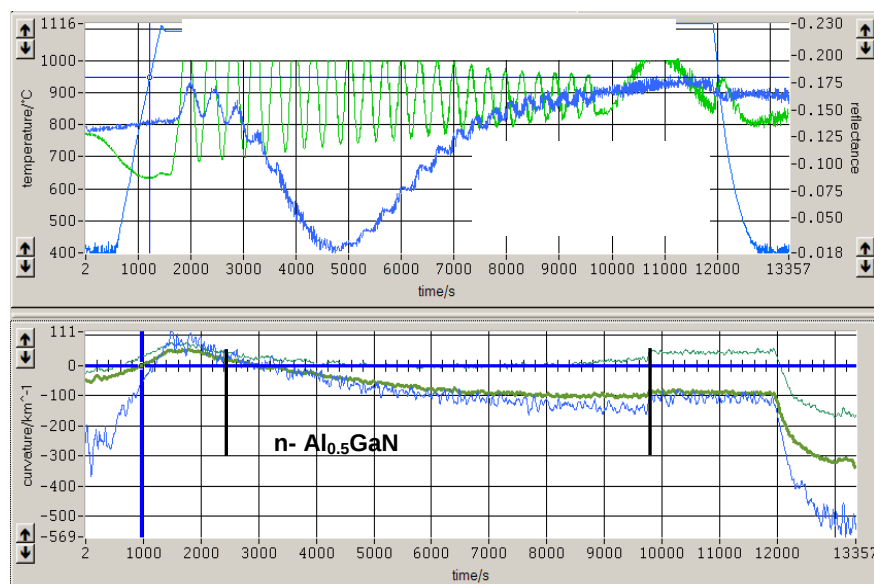


Abb. 3 oben: In-situ Reflexions- und Temperaturmessungen während der Abscheidung von 700 nm AlGaIn auf planarem AlN/Saphir Template (grün) bzw. auf ELO-AlN Template (blau) unten: Krümmungstransienten der beiden Strukturen, grün – auf planarem AlN / Saphir, blau – auf ELO-AlN

Zusätzlich wurden Messaufbauten zur Erweiterung des Pyrometrie-Temperaturbereichs zu höheren Züchtungstemperaturen ($>1400^{\circ}\text{C}$) mittels Pyrometrie bei 633 nm bzw. zu niedrigeren Suszeptortemperaturen ($<600^{\circ}\text{C}$) mittels Pyrometrie bei 1550 nm und deren Einbindung in die aktuelle Mess-Software am FBH getestet.

Arbeitspaket 1.1.3 und 1.1.7 – Epitaxie 350 nm und 310 nm

Die ursprüngliche Planung sah die Entwicklung der kompletten LED-Struktur auf der Multiwaferanlage des FBH vor. Auf Grund größerer technischer Probleme an dieser Anlage verbunden mit längerem Stillstand sowie der Erkenntnis, dass zur reproduzierbaren Herstellung der AlN-Templates ein definierter Reaktorzustand erforderlich ist, und dieser Prozess daher nicht mit Prozessen zur AlGaIn-Epitaxie kompatibel ist, wurden die aktiven Schichtstrukturen auf dem Reaktor der TUB weiteroptimiert (siehe Bericht TUB). Die Arbeiten am FBH an den aktiven LED-Schichten wurden erst in 2013 wieder aufgenommen. Es konnte gezeigt werden, dass In-haltige AlGaIn Schichten als Quantenwells (QWs) effizienter sind als reine AlGaIn-QWs. Zusätzlich können für 350-360 nm auch GaN QWs mit AlGaIn Barrieren verwendet werden. Es wurde die Abhängigkeit der Lichtleistung von QW-Dicke und Anzahl untersucht. An der TUB wurden die Zusammensetzung der QWs und Barrieren sowie der Elektronenblocker und Löcherinjektionsschichten untersucht.

Es konnte durch on-wafer-Messungen demonstriert werden, dass durch den Einsatz von defektreduziertem ELO-AlN die Leistung der LEDs deutlich gesteigert werden kann im Vergleich zu den planaren, höher versetzten AlN-Templates (Abb. 4). Allerdings führen Inhomogenitäten über die ELO-Templates zu einer deutlich größeren Streuung der optischen Leistung der LEDs über den Wafer, als dies bei planaren Templates der Fall ist. Hier besteht noch die Notwendigkeit der Verbesserung der Prozessstabilität und Homogenität. Der in Abb. 4 dargestellte Zwischenstand wurde im Projektverlauf deutlich übertroffen, wobei nur LEDs auf planaren AlN-Templates vollständig prozessiert und montiert wurden.

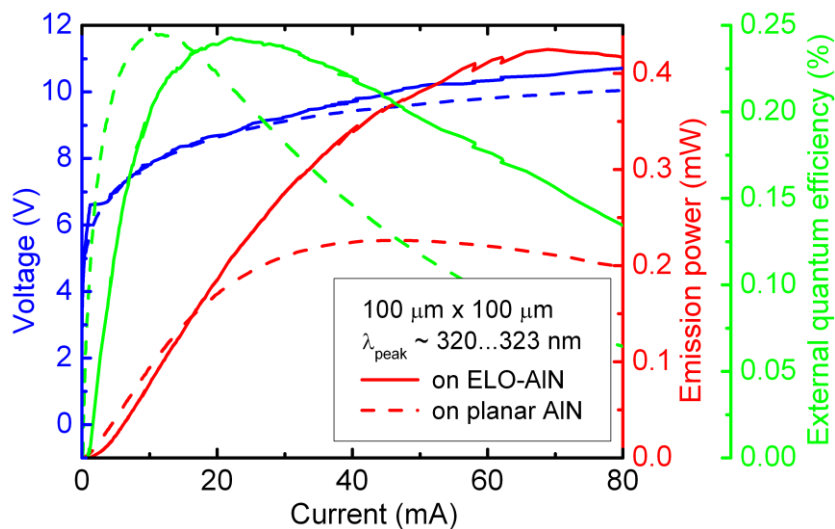


Abb. 4 Lichtleistung (on wafer, In-dot-Test) als Funktion des Injektionsstromes von 300 nm LEDs auf ELO-AlN bzw. auf planarem AlN Template. Die Leistung auf ELO-AlN ist deutlich (Faktor 3 – 4) höher.

Die Optimierung der Züchtungsbedingungen und der Schichtstruktur für die 310 nm LEDs an der TUB führten zu einer deutlichen Erhöhung der Ausgangsleistung auf 1.1 mW@20 mA bereits auf kostengünstig im Multiwafer-Reaktor hergestellten, planaren AlN/Saphir Templates, womit das Projektteilziel von 0.9 mW@20 mA erreicht wurde. Die erzielten Effizienzen der 310 nm LED-Strukturen sind vergleichbar bzw. höher als die kommerziell erhältlicher LEDs von z.B. SETi (Abb. 5). Maßnahmen zur Verbesserung der Lichtauskopplung (Aufräumung Substrat, Lift-off) wurden dabei bisher nicht eingesetzt. Die Lebensdauer solcher LEDs betrug über 1000 h bei Betriebsströmen von bis zu 300 mA (Abb. 7-9).

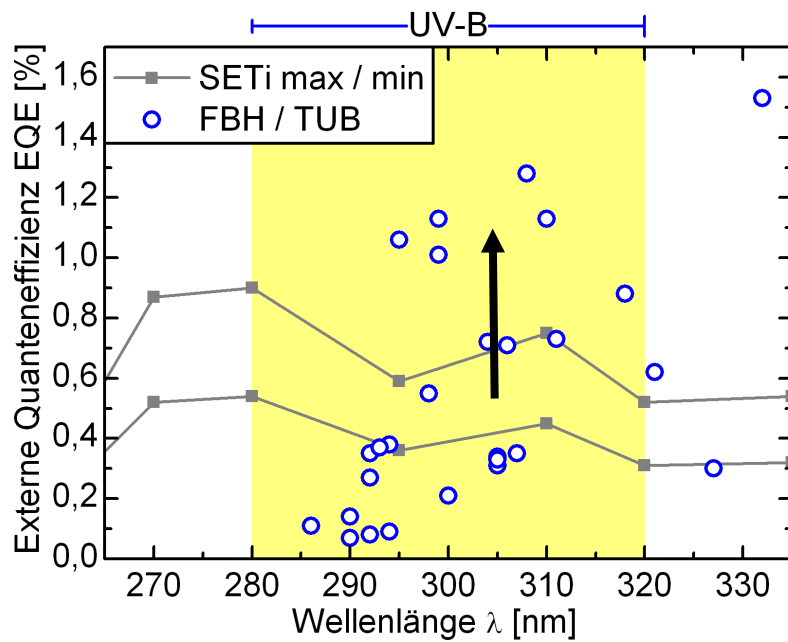


Abb. 5 Externe Quanteneffizienz von LEDs des FBH/TUB (Kreise) als Funktion der Wellenlänge im Vergleich mit LEDs des kommerziellen Herstellers SETi (hellgrau Kurve). Der Pfeil markiert den Fortschritt von der ersten zur zweiten Generation der Epitaxiestrukturen mit einer Verdopplung der internen Quantenausbeute.

Arbeitspaket 1.2.2 – Chipprozess

Arbeitspaket 1.2.2.2 – 310 nm

Für ohmsche Kontakte auf $n\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}:\text{Si}$ wurde vom am FBH etablierten Ti/Al/Mo/Au – System, welches auf GaN verwendet wird, auf V/Al/V/Au umgestellt. Dadurch gelang es den Kontaktwiderstand um bis zu 4 Größenordnungen auf $< 10^{-5} \Omega\text{cm}^2$ zu verringern. Es wurde eine notwendige Formierungstemperatur von $> 700^\circ\text{C}$ zur Realisierung des geringsten Kontaktwiderstandes ermittelt (Abb. 6). Untersuchungen zum physikalischen Mechanismus der Kontaktbildung zeigten, dass der Kontakt im Wesentlichen durch die Bildung von AlN an der Grenzfläche Metall-Halbleiter ausgebildet wird und somit der Dicke der Al-Schicht eine vorrangige Bedeutung zukommt. Die notwendige Formierungstemperatur ist allerdings im Vergleich zur Formierungstemperatur des Palladium p-Kontaktes zu hoch und es kommt zu einer Degradation des p-Kontaktes. Hier besteht weiterer Optimierungsbedarf. Die Vanadium-basierten Kontakte wurden in den Prozess für die Kontaktierung der $n\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ Kontaktschicht als Standard aufgenommen.

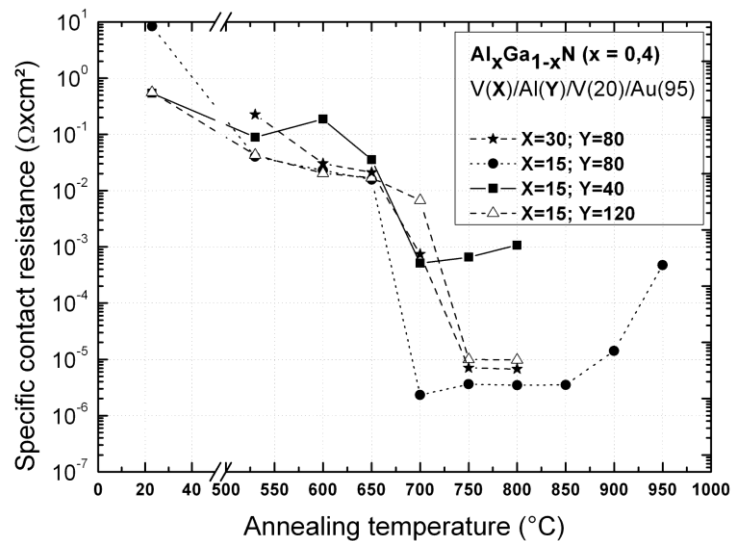


Abb. 6 Spezifischer Kontaktwiderstand von V/Al/V/Au mit unterschiedlichen V- bzw. Al-Schichtdicken auf $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{N}:\text{Si}$ in Abhängigkeit von der Formierungstemperatur.

Arbeitspaket 1.3.6 – Aufbauprozesse

Arbeitspaket 1.3.6.1 – Auf AlN Submount

Zum Vereinzeln der LED-Wafer wurde das Sägen auf Grund von Ausbrüchen an der Kante zu Gunsten des Laserritzens mit anschließendem Brechen verworfen. Allerdings ist auch diese Technologie noch nicht hinreichend stabil. Es kam z.T. zu Schädigungen der Schichtstrukturen durch das Laserritzen. Die Parameter zum Laserritzen der Saphirrückseite sowie die Halterungen der LED-Wafern konnten so optimiert werden, dass die Ritztiefe konstant bleibt und Schäden an der Wafervorderseite vermieden werden. Nach leichter Anpassung der Spaltparameter des Scriber-Breakers wurden auf diese Weise geritzte Wafer erfolgreich in Chips der Größe $600\text{ }\mu\text{m} \times 1000\text{ }\mu\text{m}$ vereinzelt.

Nach dem Lötten traten teilweise hohe Leckströme bzw. Shunts auf bei Dioden, deren Kennlinien vor der Flip-Chip-Montage noch unauffällig waren. Im Bereich des n-Kontakts auf dem Halbleiter, der mit dem Lötpad des p-Kontakts überzogen und von diesem durch eine 300 nm dicke SiN_x -Schicht getrennt ist, treten häufig heiße Stellen auf. An diesen Stellen bricht scheinbar die Isolation durch das SiN_x zusammen. Die mikroskopische Ursache im SiN_x ist noch ungeklärt. Es wurden bei der Chipherstellung alternative Isolatorschichten wie SiO_2 und Al_2O_3 getestet, die bei Verbundpartnern mittels PECVD oder ALE abgeschieden wurden. Dies führte allerdings zu keiner Verbesserung. Die Verbesserung der Ausbeute nach Aufbau, die nicht Bestandteil dieses Vorhabens war, bleibt damit eine Aufgabe für die Zukunft.

Nach Flip-Chip-Montage ausgewählter LED-Chips auf strukturierte AlN-Submounts wurden letztere auf Kupferwärmesenken geklebt. In einer kalibrierten Ulbrichtkugel wurden Leistungskennlinien aufgenommen. LEDs mit einer Emissionswellenlänge um 300 nm liefern bei Strömen von 400 mA Ausgangsleistungen von bis zu 16 mW (Abb. 7). Dies zeigt, dass der thermische Widerstand ausreichend klein ist, um hohe CW-Leistungen zu ermöglichen. Die im Projekt anvisierte Ausgangsleistung von 0,9 mW bei 20 mA wurde mit 1,1 mW auf planaren AlN-Templates erreicht (Abb. 9). Die ermittelte externe Quanteneffizienz liegt mit 1,06 % oberhalb kommerzieller LEDs der Firma SET Inc. (vgl. Abb. 6). Abb. 9 zeigt die optische Leistung der TUB/FBH-LEDs bei 300 nm in Abhängigkeit von deren Betriebszeit bei konstanten Strömen (cw) von 50 mA, 150 mA und 300 mA. Die Lebensdauer der Dioden liegt oberhalb 1000 h. Zu sehen ist, dass es bei 50 mA eine

leichte Zunahme der Leistung zu Beginn der Betriebszeit (burn in) gibt und anschließend einen geringen Abfall der Leistung mit zunehmendem Betriebsstrom und Zeit.

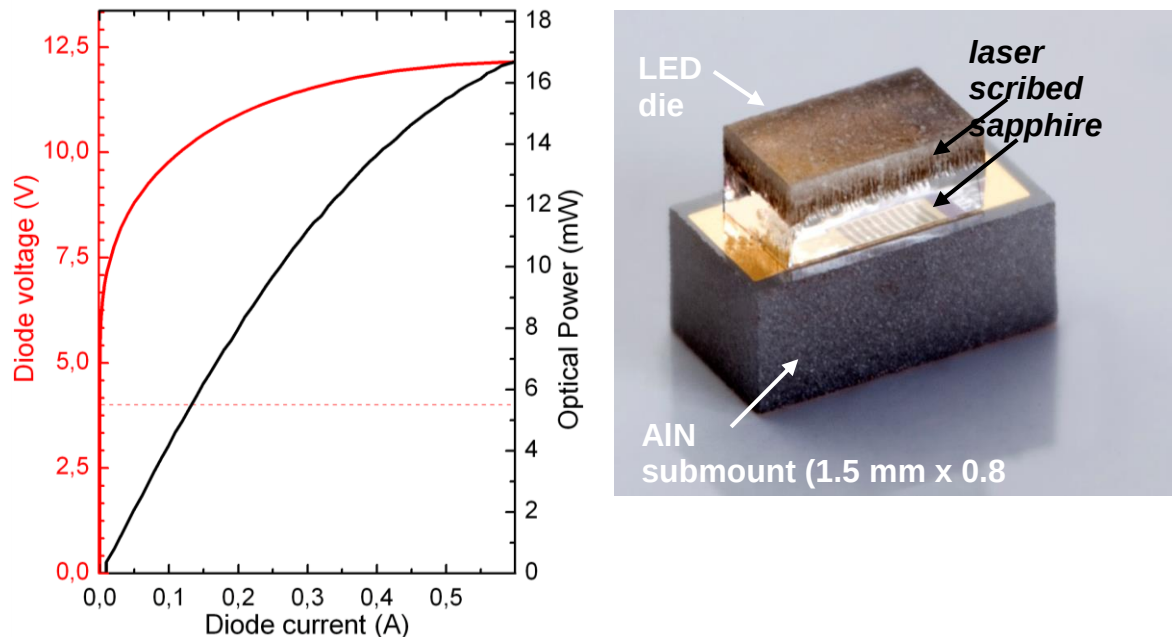


Abb. 7 Leistung-Strom- und Strom-Spannungs-Kennlinie (links) einer montierten LED mit Emission bei ca. 310 nm (rechts) auf Kupferwärmesenke in einer kalibrierten Ulbrichtkugel.

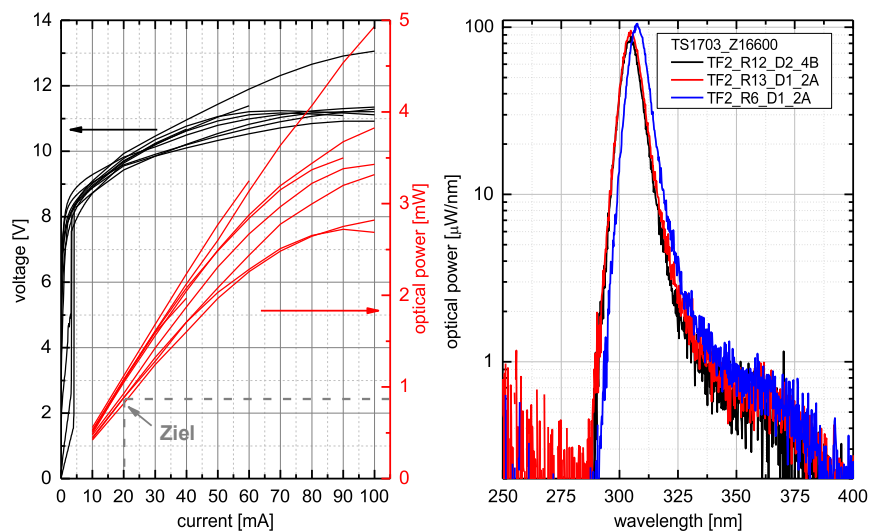


Abb. 8 Leistung- Spannungs-Strom-Kennlinien von auf Keramik-Submount aufgebauten LEDs mit Emission um 310 nm (links) sowie Spektren von 3 Bauelementen (RT, cw, 20 mA) (rechts).

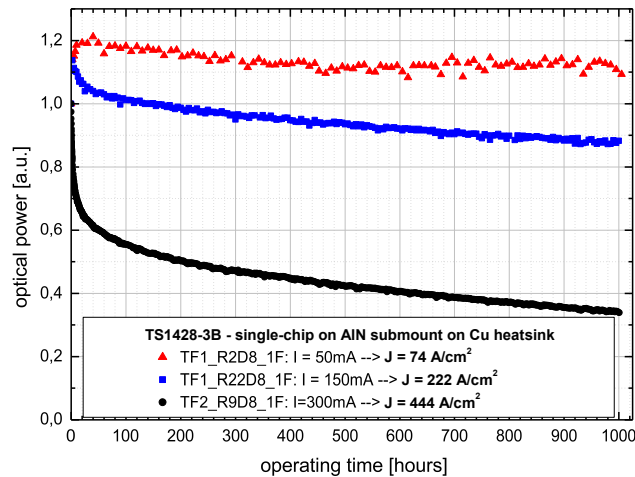


Abb. 9 Stresstests über 1000 h von montierten LEDs mit Emission um 310 nm bei 50 bis 300 mA.

Der erfolgreiche Betrieb über 1000 h bei hohen Strömen von bis zu 300 mA zeigt, dass Epitaxieschichten und Prozess das Potential bieten für anwendungstaugliche Bauelemente mit Effizienzen, die dem Stand der Technik entsprechen bzw. diesen übertreffen. Somit wurden alle Zielparameter des Projektes für LEDs wie Peakwellenlängen um 310 +/- 20 nm und Leistungen bei 20 mA >0,9 mW erfüllt. Eine weitere Erhöhung ohne Änderungen in Epitaxiestructur und –Prozess sowie im lateralen Layout und im Frontseitenprozess ist durch Verbesserung der Auskopplung durch Strukturierung des Substrats oder durch seine Entfernung z.B. durch Laser-lift-off möglich.

Arbeitspaket 1.4.2 – Bündnismanagement

Das FBH hat im Rahmen des Bündnismanagements die Managementaufgaben „Koordination FuE“, „Controlling“ sowie „Fachkräftesicherung“ bearbeitet. Darüber hinaus ist am FBH die durch die Mitglieder des WideBaSe-Konsortiums getragene Geschäftsstelle angesiedelt.

Das Managementteam traf sich meist zweimonatlich zum inhaltlichen Austausch sowie zur Abstimmung der Tätigkeiten der Geschäftsstelle und Vorbereitung der Bündnis-Veranstaltungen. Schwerpunkte der Sitzungen waren darüber hinaus Abstimmungen zu den Managementaufgaben, zum Stand der Verbundprojekte sowie zur Weichenstellung für die Verwertungsphase.

In der Managementaufgabe „Koordination FuE“ wurde die Fortschreibung des FuE-Plans sowie der Roadmap von Berlin WideBaSe wahrgenommen. Hierzu wurden die Roadmap und SWOT-Analyse aktualisiert. Darüber hinaus wurden Interessen und Vorschläge für die Verwertungsphase abgefragt und aufbereitet, die im Rahmen der Statusseminare mit den Partnern diskutiert wurden. Als Mittel nicht nur zur Koordination der FuE sondern auch zur Vorbereitung des Markteintritts auf verschiedenen Märkten wurde eine Firmen-datenbank aufgebaut.

Die Managementaufgabe „Controlling“ wurde vor allem durch die Besuche bei den Partnereinrichtungen wahrgenommen. Zusätzlich wurde der allen Partnern zugängliche Bereich des Projektserver genutzt, um sich jederzeit einen aktuellen Überblick zu vorliegenden Statusberichten aus den einzelnen Vorhaben aber auch zu den Reiseberichten zu verschaffen. Die „internen“ Quartalsberichte wurden im Rahmen der Managementsitzungen ausgewertet, wenn Abweichungen oder Zeitverzögerungen zum Projektplan auftraten. Dies

hat insbesondere auch zur Fokussierung der Aufgaben auf die Entwicklung von 300 nm LEDs im Rahmen des vorliegenden Vorhabens sowie einer Umverteilung der Aufgaben in der Epitaxie zwischen TUB und FBH geführt, da nur so die vielfältigen Aufgaben in der Epitaxie im Rahmen der Verbundprojekte zu Leistungs-LEDs, Punktstrahlern, Laserdioden und UV-Photodetektoren trotz aufgetretener technischer Schwierigkeiten am Multi-wafer-Reaktor des FBH bearbeitet werden konnten. Die entsprechenden Weichen dazu wurden in einer Sitzung des Managementteams mit den Verantwortlichen der einzelnen Projekte getroffen.

Im Rahmen der Managementaufgabe „Fachkräftesicherung“ wurde die Unterstützung der Microsystems Summer School Berlin in 2010 und 2012 durch Partner aus WideBaSe organisiert. OSA Optolight wurde darin unterstützt, im September 2012 erstmalig mit der Ausbildung zum / zur Mikrotechnologen/in zu beginnen. Es zeigt sich auch mehr und mehr, dass die Statusseminare der Verbundprojekte von den beteiligten Partnereinrichtungen zur Weiterbildung genutzt wurden, die Teilnehmerzahl stieg stetig an. Die für die Partner geöffneten internen Kolloquien bei den Forschungspartnern wurden als Weiterbildungsmöglichkeit vor allem durch die Mitarbeiter /innen der Unternehmen genutzt. Diese Öffnung wird auch für die Zukunft beibehalten werden.