

LARGE SCALE MOCVD REACTORS FOR SOLID STATE LIGHTING

F. Schulte*, L. Pauli, B. Schineller, and M. Heuken
AIXTRON AG, Kaiserstrasse 98, 52134 Herzogenrath, Germany
*e-mail: f.schulte@aixtron.com

The penetration into new optoelectronic markets such as Solid-State-Lighting (SSL) requires the consistent reduction of cost per device. The reduction of Cost of Ownership (CoO) of the MOCVD production tool is one contributor to this cost optimization strategy.

This paper will review the necessary actions to reduce the Cost of Ownership.

The on wafer uniformity, wafer to wafer (w2w), run to run (r2r) uniformity and reproducibility, respectively, is one major criteria to increase the yield of a MOCVD mass production. Results on 6-inch and even 8-inch will be discussed and an outlook is given for future wafer sizes and materials. Proper design of the reactor including excellent modeling techniques predicting the outstanding characteristics is a mandatory condition to a low CoO and quick time to the market of new reactor generations. The usage of in-situ measurement technology for a fast optimization process of new devices will be presented and discussed with regard to the reproducibility of the production system.

Overall excellent layer performance will be presented mandatory to fulfill the request of the lighting market.

Factors lowering the process times will be discussed and presented accordingly.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ГФЭ МОС РЕАКТОРЫ ДЛЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

F. Schulte*, L. Pauli, B. Schineller, and M. Heuken
AIXTRON AG, Kaiserstrasse 98, 52134 Herzogenrath, Germany
*e-mail: f.schulte@aixtron.com

В докладе будут рассмотрены вопросы снижения стоимости производства светодиодных структур при промышленном росте методом газофазной эпитаксии. Будут рассмотрены такие вопросы как однородность распределения параметров по пластине и воспроизводимость между эпитаксиальными пластинами в одном процессе и между процессами. Будут продемонстрированы результаты роста на пластинах диаметром 6 и 8 дюймов.

(Russian text is written by editors. Русский текст – ред. сборника)

ADVANCEMENTS IN MOCVD TECHNOLOGY REQUIRED TO REDUCE LED MANUFACTURING COST

A. Gurary, M. Lamarra*

Veeco Compound Semiconductor, 394 Elizabeth Avenue, Somerset, NJ 08873

* e-mail: agurary@veeco.com

The recent explosion of the LED-backlit flat panel display television market presents both tremendous opportunities and challenges to the Compound Semiconductor community, including Metal-organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) tool manufacturers. On the one hand, substantial multiple system orders enable more resources to be applied to equipment development to significantly increase its performance. On the other hand, this new market presents MOCVD equipment manufacturers with a new set of requirements, somewhat identical to the silicon semiconductor and flat panel display markets.

As major LED manufacturers have already demonstrated the ability to mass produce sufficiently efficient white LEDs, the primary challenge for the modern LED industry is to significantly reduce LED cost. The most recent U.S. Department of Energy Solid State Lighting R&D Manufacturing Roadmap calls for an 85% reduction in final packaged LED cost within the next 6 years. According to our estimate the operational cost of epi must decline by at least 80% to help LED manufacturers meet the targeted LED cost efficiency goals for solid state lighting. The single largest cost driver in LED manufacturing is yield. For MOCVD equipment manufacturers such as Veeco, the most significant impact to yield is through reactor gas flow uniformity, thermal uniformity of the substrates, and repeatability: wafer-to-wafer, run-to-run, and tool-to-tool.

The LED industry is currently demanding epi yield of 90% of the entire wafer production population in a 5 nm bin. Near term requirements will tighten to 4 and then 2 nm bin sizes at the same yield of 90%. What is even more challenging is that 90% yield at 2 nm bin will be required for any wafer size: 100 mm, 150 mm or 200 mm. Achieving these results requires detailed understanding of the flow and temperature fields on the wafer carrier which can be provided only through the progress in detailed modeling and in-situ implementation.

Veeco's newest technology offerings are demonstrating a path to achieve these targets for the industry by optimizing gas flow uniformity within the reactor across the wafer carrier, by optimizing wafer pocket geometry to account for wafer bowing and thermal proximity effects and by the integration of in-situ metrology and active process control to tune growth steps. As an example, the figure at the end of abstract shows PL wavelength distribution for a production run of twelve 4" wafers. Every wafer exceeds a die yield of 90% in a 5 nm bin. All wafers are sub-1.3 nm, 1 sigma uniformity – most below 0.8 nm. The run-to-run mean PL wavelength repeatability over a 75 run mini-marathon was within 1.6 nm. Additionally, LED manufacturers want to run only one recipe for each product for all production runs between consecutive preventive maintenance events and utilize tool operators with minimum education and experience level. This eliminates the traditional approach of process tuning in between runs.

Second to yield and process repeatability in LED cost drivers is equipment throughput. Several factors dictate throughput, including batch capacity, process cycle time, idle time between runs and tool uptime.

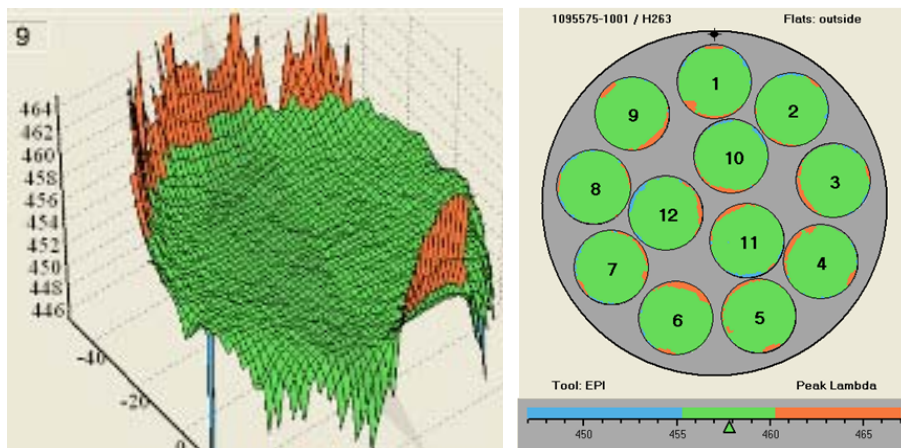
Batch capacity is controlled by the MOCVD equipment manufacturer and is based upon the physical dimensions of the reactor and the ability to adequately provide and control thermal and flow uniformity. Reactor batch sizes have been increasing steadily over the past 20 years. In the case of Veeco's MOCVD equipment, the surface of the wafer carrier has increased almost 40 times. It is evident that at some point we will come to a point of diminishing returns in increasing reactor sizes, but the ultimate reactor size which provides the optimal Cost of Ownership is still an open issue.

When it comes to reducing process cycle time, the wide array of customer-unique LED structures, and the intellectual property that surrounds them, narrows the area of influence for the MOCVD equipment manufacturer to the only common denominator in all structures, GaN growth rate. The longest process step in a GaN LED structure is typically the bulk n-GaN layer. Due to the inherently slow growth rate, this one essential layer typically takes approximately 2 – 2.5 hours to grow. More recent work in Veeco's lab, verified by a production customer, is the ability to grow bulk GaN at 3 – 4 times the normal rate of 2 microns per hour. At 8.5 microns/hour growth rate, we grew a 4.5 micron thick bulk GaN layer and demonstrated approximately 2% GaN thickness uniformity on both the inner and outer rings with superior crystal quality in the 002 and 102 planes for 4" wafers. Even if this growth rate is reduced by 25% of its' full capabilities, on a typical 9-hour LED run, the runs per day increases from 2.6 to 3.3; a 22% increase in throughput. This amounts to an extra 2,600 4" wafers per year per tool. Cost of Ownership calculations

show that achieving GaN growth rate of 10 microns per hour would eliminate the need for Hydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE) technology for LED manufacturing.

For high volume manufacturing, MOCVD equipment cannot be idle for large amounts of time. Therefore, the conventional practices of manual loading and unloading of wafers between runs while having to open the reactor, is no longer acceptable. MOCVD equipment must utilize either robotic wafer loading or wafer carrier loading to reduce idle time between runs. Several LED manufacturers are considering true cassette-to-cassette wafer loading where a robot unloads new sapphire substrates from incoming cassettes and at the end of the process unloads the finished epi wafer back into the cassette before transport to the Characterization Area. As most people who've grown GaN epi know, the process has a reputation of being rather dirty. In the case of some MOCVD equipment, operators must clean their reactor after each and every run. While this may have been acceptable in the past when volume demand was low, high volume manufacturing fabs will not be able to continue operating with this much tool downtime and resources required for equipment cleaning. Techniques such as Veeco's wafer carrier exchange along with off-line carrier cleaning or eventually in-situ reactor cleaning are needed to optimize tool availability.

In addition to the changes in the reactor technology, Veeco MOCVD equipment is transitioning from stand-alone process tools to fully-integrated nodes within the manufacturing area. Newer fabs are starting to require data transfer on all digital and analog devices in the equipment. We offer the integration of SEMI's SECS/GEM communication protocol for data transfer between the process tool and a central factory server. In conclusion, Veeco's line of GaN MOCVD process equipment is well-positioned to address the challenges facing the HB LED industry as it transforms into a high volume production model.



		Wafers												Averages
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
(5 nm bin)	Yield (%)	92.2	94.2	92.5	92.1	94.6	91.2	93.3	95.0	92.0	92.9	93.1	93.1	93.0
	1 σ , nm	0.64	0.74	0.62	0.72	1.26	0.59	0.59	0.76	0.81	0.65	1.07	0.72	0.8

Figure 1. PL map for 12 wafer 4'' run on VEECO K465GaN system. Every wafer exceeds a die yield of 90% in a 5 nm bin. All wafers are sub 1.3 nm, 1 sigma uniformity – most below 0.8 nm.

УЛУЧШЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ГФЭ МОС НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ СТОИМОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СВЕТОДИОДОВ

А. Гурару, М. Ламарра*

Veeco Compound Semiconductor, 394 Elizabeth Avenue, Somerset, NJ 08873

* e-mail: agurary@veeco.com

В статье рассматриваются последние изменения в установках газофазной эпитаксии фирмы Veeco, направленные на увеличение выхода годных при производстве светодиодов и на уменьшение общей стоимости производства.

MEASUREMENT OF REAL WAFER TEMPERATURE DURING GaN GROWTH ON SAPPHIRE AND SiC

M. Borasio^{2}, K. Haberland², T. Schenk², F. Brunner¹, M. Weyers¹, J.-T. Zettler²*

¹Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik, Gustav-Kirchhoff-Str. 4, 12489 Berlin, Germany

²LayTec GmbH, Helmholtzstr. 13-14, D-10587 Berlin, Germany, Email: *info@laytec.de

The growth temperature is the most critical parameter to control during MOVPE growth. Especially for LED production of GaN LEDs the emission wavelength and uniformity and, therefore, the yield strongly depend on the temperature variation across the wafer. As infrared (IR) pyrometers can only measure the temperature of IR absorbing and emitting materials, for GaN epitaxy on sapphire and SiC only the pocket temperature of the susceptor under the wafer is accessible. Due to the strained growth and the evolving wafer curvature, the true wafer temperature significantly deviates from the pocket temperature. Up to now, only in-situ measurements of the wafer curvature during growth could be used to indirectly estimate the wafer temperature and its profile.

A newly developed UV pyrometer takes advantage of the absorption of the GaN layer at 400 nm. Using the tool detecting thermal radiation of GaN at the wavelength of 400 nm, we were able to directly measure the surface temperature of GaN layers on a sapphire or SiC wafer during growth in production-line MOCVD systems.

The growth of a full GaN MQW LED structure was studied on 3" and 4" wafers. True wafer surface temperature, pocket temperature, three wavelength reflectance and wafer curvature have been measured simultaneously and are discussed in comparison to ex-situ PL mapping of the wafers. All parameters have been measured at various positions across the wafers' diameter, allowing for spatially resolved results on thickness uniformity, temperature and wafer curvature distribution. The different behavior of a 2" wafer in the same run will be discussed as comparison.

Our data shows that many effects on the true wafer surface temperature are invisible to the conventional infrared pyrometer.

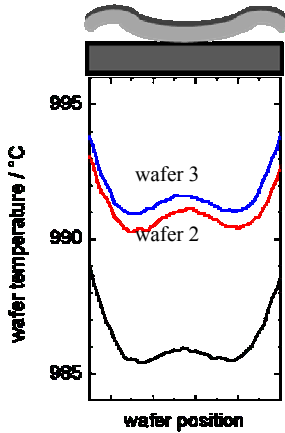


Fig. 1: GaN buffer growth

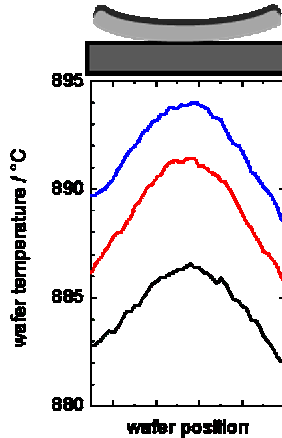


Fig. 2: After switching from H₂ to N₂

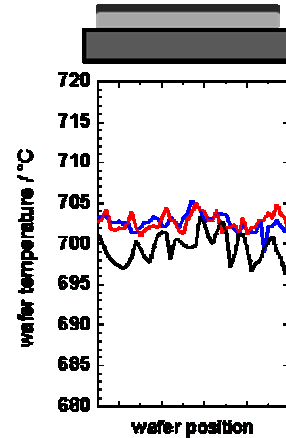


Fig. 3: At MQW temperature

Fig. 1, 2 and 3 compares wafer temperature linescans of three wafers (3" diameter) measured in the same run under different process conditions. The curves show the temperature distribution across the wafers; the wafer bowing is shown in the drawings above.

ИЗМЕРЕНИЕ РЕАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДЛОЖКИ ПРИ РОСТЕ GaN НА САПФИРЕ И SiC

M. Borasio^{2*}, *K. Haberland*², *T. Schenk*², *F. Brunner*¹, *M. Weyers*¹, *J.-T. Zettler*²

¹Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik, Gustav-Kirchhoff-Str. 4, 12489 Berlin, Germany

²LayTec GmbH, Helmholtzstr. 13-14, D-10587 Berlin, Germany, Email: *info@laytec.de

При эпитаксиальном росте методом газофазной эпитаксии температура подложки является одним из критически важных параметров, влияющих на длину волны излучения и однородность распределения параметров по пластине. Стандартные инфракрасные пирометры (при росте на ИК-прозрачных материалах, таких как сапфир и SiC) могут измерять только температуру подложкодержателя, при этом температура на поверхности подложки из-за изгибов может существенно отличаться. В работе предложен метод прямого измерения температуры GaN с использованием пирометра работающего на длине волны 400 нм (в области фундаментального поглощения GaN) при температуре роста.

(Russian text is written by editors. Русский текст – ред. сборника)

ОПТИМИЗАЦИЯ СВЕТОВЫХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ GaN

А.А. Найдин, А.Ф. Иванов, Е.В. Еришов, С.А. Крюков, О.А. Розачков, О.И. Розачков

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно - исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина» (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина») ул.Васильева, 13, а/я 245, 456770. г. Снежинск, Челябинская область, тел.:(35146) 5-11-21, 5-10-70, e-mail: c5@five.ch70.chel.su

С 2003 года в РФЯЦ-ВНИИТФ ведутся работы по получению светодиодных структур синие – зеленого диапазона излучения методом МОС – гидридной эпитаксии. В декабре 2007 года завершен первый этап освоения технологии. Получена СИД структура с длиной волны $\lambda=465$ нм и эффективностью излучения около 30 лм/Вт. Данные характеристики соответствуют требованиям, предъявляемым к светодиодам массовой группы производства.

С 2008 года начались работы по получению СИД структур высокой яркости. Предстояло решить следующие задачи:

- повысить эффективность излучения светодиодных структур $\lambda=465\pm 5$ нм (синий диапазон) до 80 лм/Вт;
- разработать промышленную технологию выращивания светодиодных структур с длиной волны излучения $\lambda=525\pm 5$ нм (зеленый диапазон), эффективностью излучения не менее 60 лм/Вт;

Данная разработка позволит расширить номенклатуру светотехнических изделий на Российских рынках бытовой и специальной техники.

Для выполнения этих задач было принято решение о проведении модернизации имеющейся установки АИХ2400G3 НТ. Модернизация установки проводилась по следующим направлениям:

- Переход от конфигурации реактора 5x3 дюйма на новую систему 11x2 дюйма;
- Обновление систем очистки газов;
- Модернизация линии силана SiH₄;
- Модернизация линий TMIp.

Перенос технологии выращивания ярких светодиодных структур с конфигурации 5x3 дюйма на новую систему 11x2 дюйма планировалось осуществить по отработанной схеме (послойно).

Переход на новую конфигурацию реактора позволил осуществить новые технологические решения, применение которых ранее не приносило ожидаемых результатов. В числе новшеств следует отметить:

- Увеличение толщины буферного GaN слоя n-типа с 3 до 4,5 мкм. Достигнута подвижность носителей заряда 532-546 см²/В•сек. Ранее подвижность не превышала 480 см²/В•сек. Следует отметить, что такое высокое значение подвижности носителей заряда получено не только из-за увеличения толщины буферного слоя, но и за счет увеличения скорости роста до 2 мкм/час на новой конфигурации реактора. Именно скорость роста 2 мкм/час является наиболее оптимальной скоростью для выращивания p/n кристаллов на основе соединений GaN, что также подтверждено нами экспериментально. Увеличение толщины буферного слоя и оптимизация скорости роста приводит к снижению плотности дефектов. Этот факт подтверждается уменьшением ширины максимума рентгеновской дифракции по кристаллографическим направлениям (002) и (114).

- Рост слоев InGaN активной области с $\lambda = 460$ нм при более высокой температуре (~ 820 °С). Это привело к увеличению интенсивности фото- и электролюминесценции более чем в два раза при сохранении заданной длины волны излучения 460 нм, так как рост эпитаксиальных слоев на основе соединений GaN/InGaN при высокой температуре позволяет получать более совершенные кристаллические слои.

Опыты, проведенные на новой конфигурации реактора, позволили впервые в практике РФЯЦ-ВНИИТФ получить светодиодные структуры зеленого диапазона излучения (с $\lambda \sim 525$ нм.). Эксперименты по улучшению электрофизических и оптических характеристик структур данного диапазона излучения планируются провести в ближайшее время. Работы в данном направлении являются перспективными, поскольку производителей светоизлучающих структур такого типа в РФ нет.

Структуры, выращенные в РФЯЦ-ВНИИТФ были переделаны в ОАО «НИИПП» г.Томск в чипы и светодиоды. Все чипы светодиодов изготовлены по одной технологии со светоотдачей ~ 45 лм/Вт при токе 300 мА. Однако, следует отметить, что измерения проводились на кристаллах без

утолщения токопроводящих шин. Поэтому последовательное сопротивление у светодиодов составляет 4 Ом, вместо расчетных 2 Ом. Следовательно, после окончания технологического процесса следует ожидать увеличение светоотдачи.

В завершении следует сказать, что проведенная модернизация установки позволит осуществить новые технологические операции, недоступные ранее:

- выращивание Al содержащих барьерных слоев;
- рост слоев активной области разного состава ($\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}/\text{In}_{2.0}\text{Ga}_{8.0}\text{N}$).

От данных технологических операций следует ожидать дополнительного увеличения эффективности излучения на структурах РФЯЦ – ВНИИТФ еще на 30 – 40 %.

В итоге, впервые в практике РФЯЦ-ВНИИТФ выращены структуры зеленого диапазона излучения (525 нм). На полученных из структур с $\lambda \sim 460$ нм светодиодах достигнута светоотдача 45 лм/Вт, что уже находится на уровне промышленных мировых аналогов и имеет коммерческую ценность.

OPTIMIZATION OF LIGHT AND ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF GaN-BASED LED STRUCTURES.

A.A.Naidin, A.F.Ivanov, E.V.Ershov, S.A.Krukov, O.A.Rogachkov, O.I.Rogachkov

Federal State Unitary Enterprise Academician Zababakhin Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics (FSUE «RFNC-VNIITF»)

Vasilyev Street, Bld. 13, POB 245, 454770, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia
tel.:(35146) 5-11-21, 5-10-70, e-mail: c5@five.ch70.chel.su

Since 2008 RFNC-VNIITF started works on production of LED structures of high brightness of dark blue radiation band and works on the development of industrial technology for growing of LED structures of green radiation band. So the available installation of MOS hydride epitaxy AIX2400G3 HT was modified. Modification allowed implementation of the new technological solutions which earlier did not bring expected results. Among such solutions: thickening of buffer GaN layer of n-type from 3 to 4.5 μm ; increase of the growth rate up to 2 $\mu\text{m}/\text{h}$; growth of InGaN layers of active area with $\lambda = 460$ nm at higher temperature ($\sim 8200\text{C}$).

RFNC-VNIITF has practically grown LED structures of green radiation band (with $\lambda \sim 525$ nm.) for the first time.

Light efficiency of LEDs grown from RFNC-VNIITF structures reaches 45 lm/W, that already corresponds the level of industrial world analogues and has commercial value.