



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-12-19>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.382.323

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ОКОНЧАНИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ СЛОЕВ p-GaN и AlGaN ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ p-GaN/AlGaN/GaN С ДВУМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ГАЗОМ

А. Д. ЮНИК, А. Г. ШИДЛОВСКИЙ

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 31.08.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** Методом лазерной интерферометрии и сканирующей электронной микроскопии установлены закономерности изменения во времени интенсивности отраженного сигнала, регистрируемого детектором лазерного интерферометра с рабочей частотой 670 нм в процессе реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме в атмосфере  $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$  слоев GaN, p-GaN и AlGaN в гетероструктурах типов AlGaN/GaN и p-GaN/AlGaN/GaN, обусловленные изменениями их показателей преломления и скоростей травления. При реактивном ионном травлении в индуктивно-связанной плазме слоев GaN и p-GaN интенсивности отраженного сигнала изменяются по периодическому закону с периодом изменения толщины порядка 144 нм, а для слоев типа AlGaN – порядка 148 нм, что обусловлено различиями их показателей преломления и скоростей травления. При переходе границы раздела p-GaN/AlGaN и AlGaN/GaN наблюдается скачкообразное изменение интенсивности отраженного сигнала в пределах 2,7–9,5 % в течение 20–40 с, обусловленное изменениями концентрации алюминия, показателей преломления и скорости травления на границах раздела. Изменение периодичности интерферограммы, сопровождающееся скачком интенсивности при переходе фронта травления через границу раздела p-GaN/AlGaN и AlGaN/GaN, позволяет с помощью лазерной интерферометрии в реальном масштабе времени определять время окончания процесса реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме слоев AlGaN и p-GaN в гетероструктурах типов AlGaN/GaN и p-GaN/AlGaN/GaN с двумерным электронным газом. Полученные результаты могут быть использованы для формирования элементов устройств СВЧ и силовой электроники на основе гетероструктур типа AlGaN/GaN.

**Ключевые слова:** плазмохимическое травление, индуктивно-связанная плазма, лазерный интерферометр, нитрид галлия, гетероструктура, транзистор с высокой подвижностью электронов.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Юник А. Д., Шидловский А. Г. Использование лазерной интерферометрии для определения времени окончания плазмохимического травления слоев p-GaN и AlGaN гетероструктуры p-GaN/AlGaN/GaN с двумерным электронным газом. Доклады БГУИР. 2022. 20 (7). С. 12–19.

## USE OF LASER INTERFEROMETRY TO DETERMINE THE END TIME OF THE PLASMA-CHEMICAL ETCHING OF p-GaN AND AlGaN LAYERS OF THE p-GaN/AlGaN/GaN HETEROSTRUCTURE WITH TWO-DIMENSIONAL ELECTRON GAS

ANDREI D. YUNIK, ANDREI H. SHYDLOUSKI

*JSC "INTEGRAL" – "INTEGRAL" Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 31.08.2022*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** Regularities of the reflected signal intensity changing in time, recorded by the detector of the laser interferometer with the operating frequency of 670 nm during the inductively coupled plasma reactive ion etching in a  $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$  atmosphere of GaN, p-GaN and AlGaN in AlGaN/GaN and p-GaN/AlGaN/GaN heterostructures has been established by laser interferometry and scanning electron microscopy methods due to the changes in refractive indices and etching rates. During inductively coupled plasma reactive ion etching of GaN and p-GaN layers, the intensity of the reflected signal changes according to a periodic law with the thickness change period of about 144 nm, and for AlGaN layers about 148 nm, which is due to differences in their refractive indices and etching rates. During the crossing of the p-GaN/AlGaN and AlGaN/GaN interface, there is an abrupt change in the intensity of the reflected signal within 2.7–9.5 % for 20–40 s, due to changes in the aluminum concentration, refractive indices, and etching rate at the interfaces. The change in the periodicity of the interferogram, which is accompanied by a jump in intensity when passing through the etching front through the p-GaN/AlGaN and AlGaN/GaN interface, makes it possible to determine the end time of the inductively coupled plasma reactive ion etching of the AlGaN and p-GaN layers using laser interferometry in real time in AlGaN/GaN and p-GaN/AlGaN/GaN heterostructures with two-dimensional electron gas. The obtained results can be used to form microwave and power electronics devices elements which are based on the AlGaN/GaN heterostructures.

**Keywords:** plasma-chemical etching, inductively coupled plasma, laser interferometer, gallium nitride, heterostructure, high electron mobility transistor.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Yunik A. D., Shydloouski A. H. Use of Laser Interferometry to Determine the End Time of the Plasma-Chemical Etching of p-GaN and AlGaN Layers of the p-GaN/AlGaN/GaN Heterostructure with Two-Dimensional Electron Gas. Doklady BGUIR. 2022. 20 (7), 12–19.

### Введение

В последнее десятилетие активное развитие получила технология создания устройств на широкозонных полупроводниках, в частности, на гетероструктурах (ГС) на основе GaN с двумерным электронным газом (ДЭГ). Среди таких устройств особое место занимают транзисторы с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ). Для реализации ТВПЭ, как правило, используются ГС, выращенные на подложках кремния, сапфира или карбида кремния, включающие в себя целый ряд слоев, основными из которых являются GaN, AlN, AlGaN, а также p-GaN [1].

Слои ГС на основе GaN подвергают плазмохимическому травлению (ПХТ) при формировании изоляции устройств мезаканавками [2], областей затвора ТВПЭ [3], низкоомных омических контактов [4] и др. Как правило, ПХТ слоев ГС на основе GaN реализуют реактивным ионным травлением в индуктивно-связанной плазме (РИТ ИСП) в хлорсодержащих средах ( $\text{Cl}_2$  или  $\text{BCl}_3$ ) с добавлением кислорода ( $\text{O}_2$ ) [5]. Основной особенностью данного процесса при формировании элементов ТВПЭ является необходимость прецизионного травления слоев ГС толщиной от нескольких единиц до нескольких десятков нанометров. Например, при селективном травлении слоя p-GaN относительно AlGaN при формировании области затвора нормально-закрытого ТВПЭ необходимо остановить травление точно на границе раздела, так как даже

незначительный затрав в AlGaIn может приводить к существенному уменьшению концентрации электронов в ДЭГ и, как следствие, к увеличению сопротивления в открытом состоянии ( $R_{ds_{on}}$ ) активной области канала транзистора [6].

Скорость, глубина и время окончания в процессе ПХТ обычно оцениваются предварительно для каждого слоя в отдельности по времени его травления на контрольных образцах. Однако в случае ПХТ тонких слоев, входящих в состав ГС для ТВПЭ, знания скорости травления каждого отдельного слоя, определенного предварительно, становится недостаточно. Для решения задачи прецизионного травления могут быть использованы различные методы контроля окончания процесса травления, такие как оптико-эмиссионная спектроскопия (ОЭС), спектроскопическая рефлектометрия (СР), спектральная эллипсометрия (СЭ), лазерная интерферометрия (ЛИ) и др. [7].

ОЭС, в том числе с применением дополнительных датчиков мониторинга импеданса плазмы, позволяет контролировать химическое и физическое состояние продуктов реакции в процессе ПХТ путем анализа собранных данных об интенсивности их длин волн. Однако объем данных, регистрируемых методом ОЭС, довольно велик, а процесс их обработки в реальном времени значительно усложняется из-за наличия встроенных шумов [8]. Также в случае ПХТ слоев ГС для ТВПЭ процесс обработки данных при использовании ОЭС может усложняться за счет присутствия примесей Al в различных концентрациях во всех слоях ГС, что ведет к снижению точности при определении времени окончания процесса травления.

Метод СР предусматривает измерение интенсивности отраженного излучения в широком диапазоне длин волн. Измерения по методу СР, как правило, выполняются в два этапа. На первом – калибровка сигнала – используют контрольный образец, для которого известен коэффициент отражения, и получают для него отраженный сигнал. На втором этапе измеряют интенсивность сигнала, отраженного от исследуемого образца, и вычисляют абсолютное значение коэффициента отражения в зависимости от длины волны. Фактически, отражательная способность образца измеряется и подгоняется к теоретической (референтной) для определения толщины слоя. Данный алгоритм подгонки, используемый для обработки данных, должен решать сразу несколько задач, таких как спектральная калибровка, фильтрация шума, распознавание характерных точек (минимумы, максимумы и т. д.) и вычисление аппроксимации первого порядка для толщины и окончательной точной подгонки, что значительно усложняет процесс [7].

Метод СЭ основан на изменении формы поляризации света после отражения от исследуемого образца при изменении толщины удаляемого слоя при ПХТ. По измеренным величинам при решении обратной задачи эллипсометрии на основе выбранной модели рассчитываются оптические параметры образца. В процессе измерения определяются не абсолютные, а относительные величины, что является важным достоинством метода [9]. Однако необходимость создания точной модели для многослойных ГС, используемых для изготовления ТВПЭ, – довольно сложная задача.

Наиболее удобным для определения времени окончания процесса ПХТ является метод ЛИ. Общий принцип детектирования сигнала лазерным интерферометром при РИТ ИСП слоев ГС на основе GaIn заключается в возникновении интерференции между потоками излучения, возникающими при их отражении от резистивной маски, поверхности слоев ГС и границы между сапфировой подложкой и слоями ГС. Отраженные световые потоки от слоев накладываются при детектировании, что интерпретируется в виде интерферограммы зависимости отражательной способности образца от времени. При этом результирующая интенсивность светового потока будет являться периодической функцией изменения толщины слоя, подвергающегося травлению. Зависимость отражательной способности от времени в общем случае будет иметь вид синусоиды, а изменение толщины удаляемого при травлении слоя за один период синусоиды  $\Delta T$ , нм, определяются по формуле [7]

$$\Delta T = \lambda / 2n, \tag{1}$$

где  $\lambda$  – рабочая длина волны детектора, нм;  $n$  – показатель преломления слоя, подвергающегося травлению, для слоев GaIn и p-GaIn  $n \approx 2,33$ , для AlGaIn  $n \approx 2,26$  [10].

Очевидно, что по интерферограмме скорости травления  $U_{тр}$ , нм/с, будет определяться как отношение изменения толщины слоя, подвергаемого травлению за один период интерферограммы, к длительности данного периода  $t$ , с

$$U_{\text{тр}} = \Delta T / t. \quad (2)$$

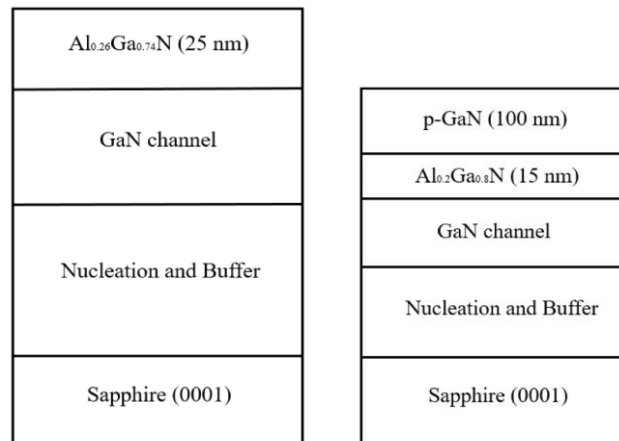
Тогда из (1) и (2) получим

$$U_{\text{тр}} = \lambda / 2nt. \quad (3)$$

Определим время окончания процесса РИТ ИСП слоев AlGaN и p-GaN в ГС типа AlGaN/GaN и p-GaN/AlGaN/GaN с ДЭГ с помощью ЛИ в реальном масштабе времени.

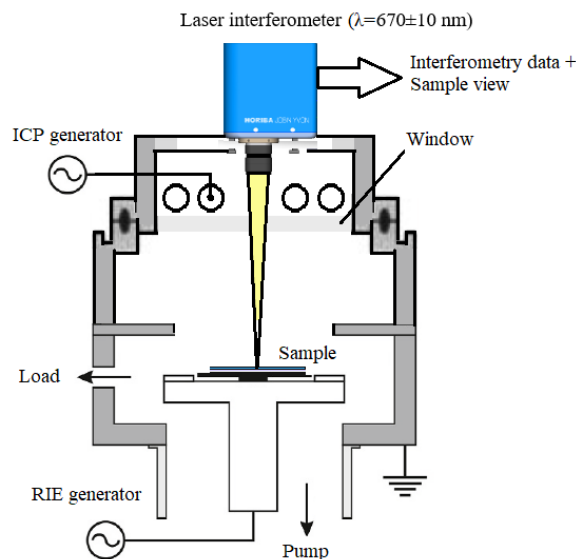
### Методика проведения эксперимента

В эксперименте использовали ГС на подложке сапфира диаметром 100 мм двух типов: GaN/Al<sub>0.26</sub>Ga<sub>0.74</sub>N с суммарной толщиной слоев порядка 3100 нм (рис. 1) и GaN/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N/p-GaN с суммарной толщиной слоев 2600 нм (рис. 2).



**Рис. 1.** Дизайн гетероструктуры GaN/Al<sub>0.26</sub>Ga<sub>0.74</sub>N **Рис. 2.** Дизайн гетероструктуры GaN/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N/p-GaN  
**Fig. 1.** GaN/Al<sub>0.26</sub>Ga<sub>0.74</sub>N heterostructure design **Fig. 2.** GaN/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N/p-GaN heterostructure design

РИТ ИСП слоев ГС на основе GaN выполняли на установке плазмохимического травления типа STE ICP200ЕС (ЗАО «НТО», Россия) в смеси Cl<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> с расходами 40/10/5 см<sup>3</sup> соответственно. Давление в камере поддерживалось на уровне 2 Па, мощность источника реактивно-ионного травления – 30 Вт, источника индуктивно-связанной плазмы – 300 Вт. Контроль изменения интенсивности световых потоков при травлении образцов и их интерпретацию в виде интерферограмм осуществляли с помощью лазерного интерферометра Horiba LEM G50 с рабочей длиной волны детектора (670 ± 10) нм (рис. 3).



**Рис. 3.** Система реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме  
**Fig. 3.** Inductively coupled plasma reactive ion etching system

На рис. 3 использованы следующие наименования: Laser interferometer – лазерный интерферометр; Interferometry data + Sample view – данные интерферометрии + просмотр образца; Window – окно; ICP generator – источник ИСП; Sample – образец; Load – загрузка; RIE generator – источник РИТ; Pump – откачка.

Глубину травления после окончания процесса дополнительно контролировали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) типа S-4800 (Hitachi, Япония).

### Результаты исследований и их обсуждение

Из интерферограммы, полученной в процессе травления слоев AlGaN и GaN в ГС типа GaN/Al<sub>0.26</sub>Ga<sub>0.74</sub>N (рис. 4), видно, что в интервале времени травления от 0 до 860 с наблюдается монотонный рост интенсивности от 43,0 до 47,5 у. е. Такой вид данной части интерферограммы обусловлен тем, что в соответствии с формулой (1) одному периоду интерферограммы при травлении слоя AlGaN будет соответствовать изменение толщины около 148 нм. Таким образом, при толщине слоя AlGaN в 25 нм на интерферограмме должно наблюдаться около 17 % одного периода интерферограммы. То есть изменение интенсивности в указанном временном диапазоне однозначно трактуется как фрагмент периодической функции (синусоиды).

В интервале времени травления от 860 до 900 с наблюдается спад интенсивности с 47,5 до 43,5 у. е. связанный с приближением фронта травления к границе раздела между слоями AlGaN и GaN, где происходит уменьшение концентрации Al в слое AlGaN и увеличение показателя преломления  $n$ . Таким образом, можно однозначно утверждать, что при РИТ ИСП слоя AlGaN на GaN участок монотонного изменения интенсивности с последующим спадом в течение 900 с на интерферограмме (рис. 4) соответствует полному удалению слоя AlGaN толщиной 25 нм. При этом скорость травления слоя AlGaN составила около 0,028 нм/с.

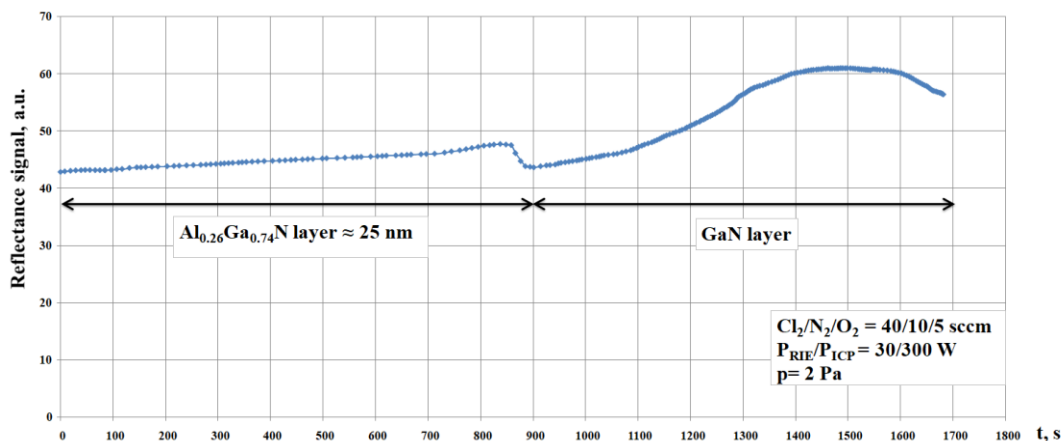
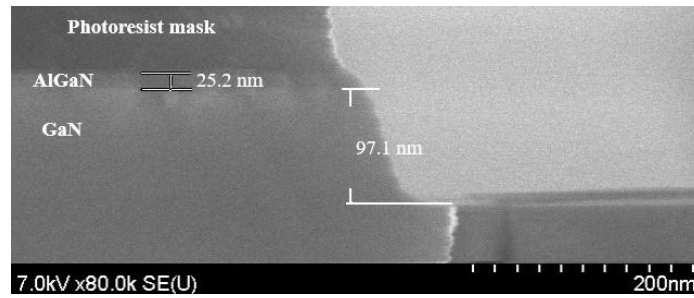


Рис. 4. Интерферограмма слоев AlGaN и GaN гетероструктуры GaN/Al<sub>0.26</sub>Ga<sub>0.74</sub>N при реактивном ионном травлении в индуктивно-связанной плазме

Fig. 4. Interferogram of the AlGaN and GaN layers of GaN/Al<sub>0.26</sub>Ga<sub>0.74</sub>N heterostructure during inductively coupled plasma reactive ion etching

Далее в интервале времени травления от 900 до 1700 с наблюдается изменение интенсивности световых потоков при травлении слоя GaN в виде части синусоиды, соответствующей более чем половине одного периода интерферограммы. Согласно формуле (1), данному периоду на интерферограмме будет соответствовать изменение толщины слоя GaN порядка 144 нм. В указанном интервале времени травления величина затрава в слой GaN составляет порядка 97 нм, что подтверждается результатами СЭМ (рис. 5). При этом скорость травления слоя GaN около 0,12 нм/с.

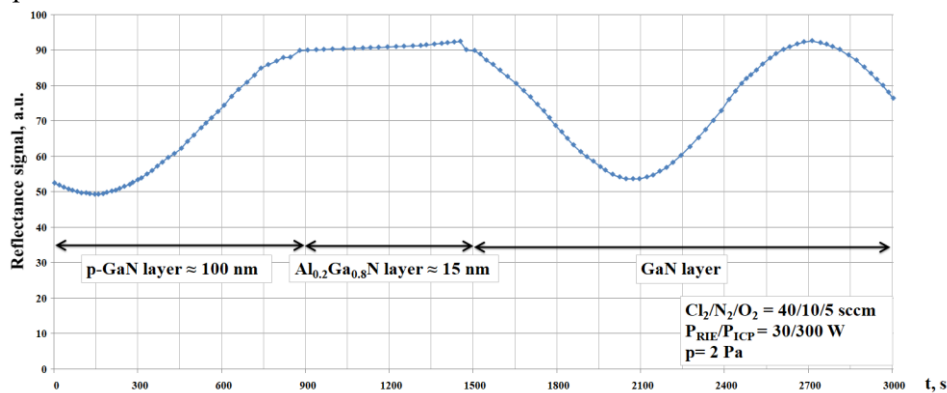
Таким образом, метод ЛИ позволяет в реальном масштабе времени определять момент окончания травления слоя AlGaN на GaN по изменению интенсивности отраженного сигнала, обусловленному изменением показателей преломления и скоростей травления AlGaN и GaN.



**Рис. 5.** СЭМ-изображение поперечного сечения гетероструктуры GaN/Al<sub>0.26</sub>Ga<sub>0.74</sub>N после травления в течение 1700 с

**Fig. 5.** Cross section scanning electron image of the GaN/Al<sub>0.26</sub>Ga<sub>0.74</sub>N heterostructure after 1700 s etching

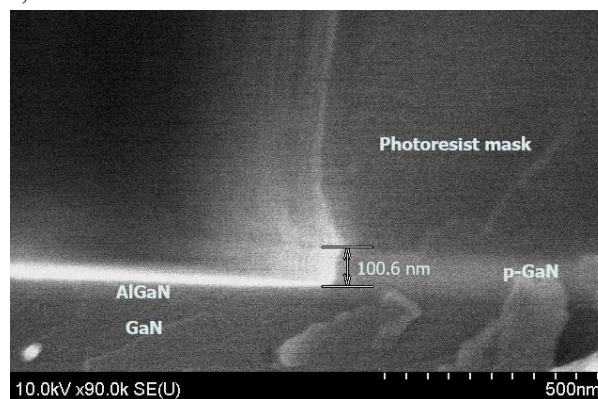
Из интерферограммы, полученной в процессе травления слоев p-GaN, AlGaN и GaN в ГС типа GaN/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N/p-GaN (рис. 6), видно, что в интервале времени травления от 0 до 880 с наблюдается изменение интенсивности световых потоков при травлении слоя p-GaN по синусоидальному закону с периодом около 144 нм, что сопоставимо с результатами для нелегированного GaN.



**Рис. 6.** Интерферограмма слоев p-GaN, AlGaN и GaN гетероструктуры GaN/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N/p-GaN при реактивном ионном травлении в индуктивно-связанной плазме

**Fig. 6.** Interferogram of the p-GaN, AlGaN and GaN layers of GaN/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N/p-GaN heterostructure during reactive ion etching in inductively coupled plasma

В интервале времени травления от 880 до 900 с наблюдается скачок интенсивности с 88 до 90 у. е., обусловленный приближением фронта травления к границе раздела между слоями p-GaN и AlGaN и, как следствие, увеличением концентрации Al в слое p-GaN и уменьшением показателя преломления  $n$ . Таким образом, можно утверждать, что при РИТ ИСП слоя p-GaN на AlGaN фрагмент синусоиды с последующим скачком в течение 900 с на интерферограмме рис. 6 соответствует полному удалению слоя p-GaN толщиной порядка 100 нм, что подтверждается результатами СЭМ (рис. 7). При этом скорость травления слоя p-GaN составила около 0,11 нм/с.



**Рис. 7.** СЭМ-изображение поперечного сечения гетероструктуры GaN/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N/p-GaN после травления слоя p-GaN

**Fig. 7.** Cross section scanning electron image of the GaN/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N/p-GaN after p-GaN layer etching

В интервале времени травления от 900 до 1465 с наблюдается монотонный рост интенсивности от 90 до 92,5 у. е., представляющий собой фрагмент синусоиды порядка 10 % от ее периода, что соответствует толщине слоя AlGaN около 15 нм.

В интервале времени травления от 1465 до 1490 с наблюдается спад интенсивности с 92,5 до 90 у. е., обусловленный приближением фронта травления к границе раздела между слоями AlGaN и GaN. Таким образом, участок монотонного изменения интенсивности с последующим спадом в интервале от 900 до 1490 с на интерферограмме (рис. 5) соответствует полному удалению слоя AlGaN толщиной 15 нм.

В интервале времени травления от 1490 до 3000 с наблюдается изменение интенсивности световых потоков при травлении слоя GaN в виде синусоиды с периодом около 144 нм, что соответствует величине затравки в слой GaN порядка 181 нм.

Таким образом, метод ЛИ также позволяет в реальном масштабе времени определять момент окончания травления слоя p-GaN на AlGaN по изменению интенсивности отраженного сигнала, обусловленному изменением показателей преломления и скорости травления слоев p-GaN и AlGaN.

### Заключение

1. Установлены закономерности изменения во времени интенсивности отраженного сигнала, регистрируемого детектором лазерного интерферометра с рабочей частотой 670 нм в процессе реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме в атмосфере  $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$  слоев GaN, p-GaN и AlGaN в гетероструктурах типов AlGaN/GaN и p-GaN/AlGaN/GaN, обусловленные изменениями их показателей преломления и скоростей травления.

2. При реактивном ионном травлении в индуктивно-связанной плазме слоев GaN и p-GaN интенсивности отраженного сигнала изменяются по периодическому закону с периодом изменения толщины порядка 144 нм, а для слоев AlGaN – порядка 148 нм, что обусловлено различиями их показателей преломления и скоростей травления. При переходе в процессе реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме границы раздела p-GaN/AlGaN и AlGaN/GaN наблюдается скачкообразное изменение интенсивности отраженного сигнала в пределах 2,7–9,5 % в течение 20–40 с, обусловленное изменениями концентрации алюминия, показателей преломления и скорости травления на границах раздела.

3. Изменение периодичности интерферограммы, сопровождающееся скачком интенсивности при переходе фронта травления через границу раздела p-GaN/AlGaN и AlGaN/GaN, позволяет с помощью лазерной интерферометрии в реальном масштабе времени определять время окончания процесса реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме слоев AlGaN и p-GaN в гетероструктуре типов AlGaN/GaN и p-GaN/AlGaN/GaN с двумерным электронным газом.

4. Полученные результаты могут быть использованы для формирования элементов устройств СВЧ и силовой электроники на основе гетероструктур AlGaN/GaN.

### Список литературы / References

1. Alex Lidow, Michael de Rooij, Johan Strydom, David Reusch, John Glaser (2020) GaN Transistors for Efficient Power Conversion, 3<sup>rd</sup> ed. Hoboken. NJ, John Wiley & Sons, Inc., 384.
2. Rüdiger Quay (2008) Gallium Nitride Electronics. *Springer Series in Materials Science*. Springer Berlin, Heidelberg, 470. DOI:10.1007/978-3-540-71892-5.
3. Zhou Y., Zhong Y., Gao H., Dai S., He J., Feng M., Zhao Y., Sun Q., Dingsun A., Yang H. (2017) p-GaN Gate Enhancement-Mode HEMT Through a High Tolerance Self-Terminated Etching Process. *IEEE J. Electron Devices Soc.* 5 (5), 340–346. DOI:10.1109/JEDS.2017.2725320.
4. Yunik A. D., Solovjov Ja. A., Zhyhulin D. V. (2022) Effect of Rapid Thermal Annealing Temperature on the Electrophysical Properties of the Ohmic Contact of Ti/Al/Ni Metallization to the GaN/AlGaN Heterostructure. *Doklady BGUIR*. 20 (3), 13–19. DOI: 10.35596/1729-7648-2022-20-3-13-19 (in Russian).
5. Han Y., Xue S., Guo W., Luo Y., Hao Z., Sun C. (2003) Highly Selective Dry Etching of GaN over AlGaN Using Inductively Coupled  $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$  Plasmas. *Jpn. J. Appl. Phys.* (42), L1139–L1141. DOI: 10.1143/JJAP.42.L1139.

6. Greco G., Iucolano F., Roccaforte F. (2018) Review of Technology for Normally-Off HEMTs with p-GaN Gate. *Mater. Sci. Semicond. Process.* (78), 96–106. DOI: 10.1016/j.mssp.2017.09.027.
7. Yoshio Nishi, Robert Doering (2007) *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology, 2<sup>nd</sup> ed.* CRC Press. 1720.
8. Noh H.-T., Kim D.-I., Han S.-S. (2015) Real Time Endpoint Detection in Plasma Etching Using Real-Time Decision Making Algorithm. *China Semiconductor Technology International Conference.* DOI: 10.1109/cstic.2015.7153380.
9. Azzam R. M. A., Bashara N. M. (1988) *Ellipsometry and Polarized Light, 3<sup>rd</sup> reprint 1999 ed.* North-Holland Personal Library. 558.
10. Brunner D., Angerer H., Bustarret E., Freudenberg F., Höppler R., Dimitrov R., Ambacher O., Stutzmann M. (1997) Optical Constants of Epitaxial AlGaIn Films and their Temperature Dependence. *Journal of Applied Physics.* 82 (10), 5090–5096. DOI: 10.1063/1.366309.

### Вклад авторов

Юник А. Д. подготовил экспериментальные образцы, выполнил анализ и интерпретацию полученных результатов.

Шидловский А. Г. выполнил травление экспериментальных образцов и интерпретировал полученные результаты.

### Authors' contribution

Yunik A. D. made experimental samples, performed analysis and interpretation of the results.

Shydloouski A. H. performed etching of experimental samples and interpretation of the results.

### Сведения об авторах

**Юник А. Д.**, ведущий инженер отраслевой лаборатории новых технологий и материалов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

**Шидловский А. Г.**, ведущий инженер-технолог отраслевой лаборатории новых технологий и материалов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

### Information about the authors

**Yunik A. D.**, Leading Engineer of the Branch Laboratory of New Technologies and Materials of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

**Shydloouski A. H.**, Leading Process Engineer of the Branch Laboratory of New Technologies and Materials of “Transistor” of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

### Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Корженевского, 16, к. 247  
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»  
Отраслевая лаборатория новых технологий и материалов  
Тел. +375 29 854-66-51  
E-mail: a.unik.gan@gmail.com  
Юник Андрей Дмитриевич

### Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,  
Minsk, Korzhenevskogo St., 16, r. 247  
JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company  
Branch Laboratory of New Technologies and Materials  
Tel. +375 29 854-66-51  
E-mail: a.unik.gan@gmail.com  
Yunik Andrei Dmitrievich