

--- расчет с использованием стандартной функции Atlas (2) с  $R_0 = 20$  нм

Рисунок 2 – Аппроксимация рассчитанных зависимостей плотности возбужденных электронов в кристалле Si от радиального расстояния до траектории иона Fe,  $E = 16$  МэВ в различные моменты времени

$$G(r, l, t) = L(l) \cdot R(r) \cdot T(t), \quad (2)$$

т. е. форма распределения носителей не меняется со временем, что не согласуется с результатами наших расчетов методом Монте-Карло.

#### Литература

1. Single-event upsets and multiple-bit upsets on a 45 nm SOI SRAM / D. F. Heidel [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2009. – Vol. 56, № 6. – P. 3499–3504.
2. Medvedev, N. A. Time-resolved electron kinetics in swift heavy ion irradiated solids / N. A. Medvedev, R. R. A. ymzhanov, A. E. Volkov, // J. Phys. D. Appl. Phys. – 2015. – Vol. 48. – P. 355303 (1–24).
3. Rymzhanov, R. A. Effects of model approximations for electron, hole, and photon transport in swift heavy ion tracks / R. A. Rymzhanov, N. A. Medvedev, A. E. Volkov // Nucl. Instrum. Methods B. – 2016. – Vol. 388. – P. 41–52.
4. Waligorski, M. P. R. The radial distribution of dose around the path of a heavy ion in liquid water / M.P.R. Waligorski, R. N. Hamm, R. Katz, // Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part D. – 1986. – Vol. 11 – P. 309–319.

УДК 621.382.323

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОКОНЧАНИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ СЛОЕВ p-GaN И AlGaN В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ ТИПА p-GaN/AlGaN/GaN С ДВУМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ГАЗОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Юник А.Д., Соловьёв Я.А., Шидловский А.Г.

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»  
Минск, Республика Беларусь

**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 p-GaN и AlGaN в гетероструктурах типа p-GaN/AlGaN/GaN. Установлено, что 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. Полученные результаты позволяют 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 типа p-GaN/AlGaN/GaN с двумерным электронным газом.

**Ключевые слова:** плазмохимическое травление, индуктивно-связанная плазма, лазерный интерферометр, нитрид галлия, гетероструктура

### DETERMINATION OF 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 USING LASER INTERFEROMETRY

Yunik A, Solovjov J., Shydlovski A.

JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company  
Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** Regularities of the changing in time of the intensity of the reflected signal recorded by the detector of the laser interferometer with an 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 p-GaN and AlGaN in p-GaN/AlGaN/GaN heterostructures has been established by laser interferometry and scanning electron microscopy methods. It has been established that 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 obtained 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 p-GaN/AlGaN/GaN heterostructures with two-dimensional electron gas.

**Key words:** plasma-chemical etching, inductively coupled plasma, laser interferometer, gallium nitride, heterostructure.

Адрес для переписки: Соловьёв Я.А., 20108, Минск, ул. Корженевского, 16, ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Филиал «Транзистор»  
e-mail: JSolovjov@integral.by

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). Слои ГС на основе GaN подвергают плазмохимическому травлению (ПХТ) при формировании изоляции устройств меза-канавками [1]; областей затвора [2]; низкоомных омических контактов [3] 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 ( $\text{O}_2$ ) [4]. Основной особенностью данного процесса является необходимость прецизионного травления слоев ГС толщиной от нескольких единиц до нескольких десятков нанометров.

Наиболее удобным методом для определения времени окончания процесса ПХТ является метод ЛИ. Общий принцип детектирования сигнала лазерным интерферометром при РИТ ИСП слоев ГС на основе GaN 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 [5].

Настоящая работа посвящена определению времени окончания процесса РИТ ИСП слоев AlGaIn и p-GaN в ГС p-GaN/AlGaIn/GaN с ДЭГ с помощью ЛИ в реальном масштабе времени.

В данной работе использовали ГС на подложке сапфира диаметром 100 мм типа GaN/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N/p-GaN с суммарной толщиной слоев порядка 2600 нм.

РИТ ИСП слоев ГС на основе GaN выполняли на установке плазмохимического травления типа STE ICR200ES (ЗАО «НТО», Российская Федерация) в смеси  $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$  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  $670 \pm 10$  нм.

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

Из полученных в результате травления интерферограмм были установлены закономерности изменения во времени интенсивности отраженного

сигнала, регистрируемого детектором ЛИ с рабочей частотой 670 нм, в процессе РИТ ИСП в атмосфере  $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$  слоев p-GaN и AlGaIn в ГС типа p-GaN/AlGaIn/GaN, обусловленные изменениями их показателей преломления и скоростей травления.

При РИТ ИСП слоев GaN и p-GaN интенсивности отраженного сигнала изменяются по периодическому закону с периодом изменения толщины порядка 144 нм, а для слоев AlGaIn – порядка 148 нм, что обусловлено различиями их показателей преломления и скоростей травления.

При переходе в процессе РИТ ИСП границы раздела p-GaN/AlGaIn и AlGaIn/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 (рис. 1).

Изменение периодичности интерферограммы, сопровождающееся скачком интенсивности при переходе фронта травления через границу раздела p-GaN/AlGaIn и AlGaIn/GaN позволяет с помощью ЛИ в реальном масштабе времени определять время окончания процесса РИТ ИСП слоев AlGaIn и p-GaN в ГС типа p-GaN/AlGaIn/GaN с ДЭГ. В частности, при РИТ ИСП слоя p-GaN на AlGaIn фрагмент синусоиды с последующим скачком в течение 900 с на интерферограмме (рис. 1) соответствует полному удалению слоя p-GaN толщиной порядка 100 нм, что подтверждается результатами СЭМ (рис. 2).

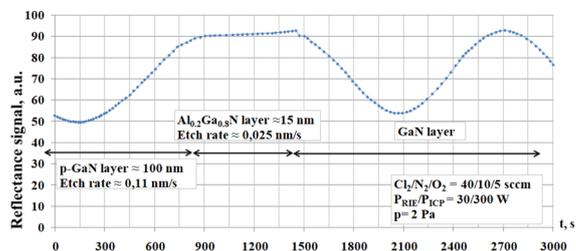


Рисунок 1 – Интерферограмма слоев p-GaN, AlGaIn и GaN гетероструктуры GaN/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N/p-GaN

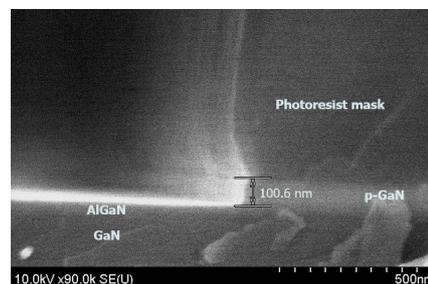


Рисунок 2 – СЭМ-изображение гетероструктуры GaN/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N/p-GaN после травления слоя p-GaN

Полученные результаты могут быть использованы для формирования элементов устройств СВЧ и силовой электроники на основе ГС типа AlGaIn/GaN.

### Литература

1. Rüdiger Quay. Gallium Nitride Electronics / Rüdiger Quay. – Springer Series in Materials Science. Springer Berlin, Heidelberg, 2008. – 470 p.
2. p-GaN gate enhancement-mode HEMT through a high tolerance self-terminated etching process / Y. Zhou [et al.] / IEEE J. Electron Devices Soc. – 2017. – Vol. 5, № 5. – P. 340–346.
3. Юник, А. Д. Влияние температуры быстрого термического отжига на электрофизические свойства оми-

ческого контакта металлизации Ti/Al/Ni к гетероструктуре GaN/AlGaN / А. Д. Юник, Я. А. Соловьёв, Д. В. Жигулин // Доклады БГУИР. – 2022. – Vol. 20, № 3. – P. 13–19.

4. Highly selective dry etching of GaN over AlGaN using inductively coupled Cl<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> plasmas / Y. Han [et al.] // Jpn. J. Appl. Phys. – 2003. – № 42. – P. L1139–L1141.

5. Yoshio Nishi. Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology (2nd Edition) / Yoshio Nishi, Robert Doering. – CRC Press, 2007. – 1720 p.

УДК 53.084

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНСТРУМЕНТА DEVI ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ SO<sub>2</sub> Литвинович Г.С., Бручковский И.И.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** В работе представлены конструктивные изменения инструмента DEVI (Doas Expedition Volcanic Instrument), внесенные по результатам полевых измерений выбросов диоксида серы. Уделено внимание модификации электрической схемы для борьбы с шумом, а также эргономическим особенностям инструмента для удобства проведения измерений.

**Ключевые слова:** ДОАС, УФ-спектрометр для полевых измерений, вулканические выбросы.

## UPGRADE OF DEVI INSTRUMENT FOR SO<sub>2</sub> EMISSIONS MEASUREMENTS Litvinovich H., Bruchkouski I.

*A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems BSU  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** The design changes of the DEVI (Doas Expedition Volcanic Instrument) that have been made according to the results of field measurements of sulfur dioxide emissions are presented. Attention is paid to the modification of the electrical circuit for noise reduction, as well as to the ergonomic features of the instrument for the convenience of measurements.

**Key words:** DOAS, UV-spectrometer for field measurements, volcanic emissions.

*Адрес для переписки: Бручковский И.И., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь  
e-mail: bruchkovsky2010@yandex.by*

Одним из способов предсказания извержений является анализ измерений газового состава вулканических выбросов [1]. В зависимости от геологических особенностей породы и близости магмы к поверхности земли, соотношение концентраций вулканических газов в выбросах (SO<sub>2</sub>, BrO и др.) может изменяться. Например, увеличение содержания SO<sub>2</sub> в выбросах свидетельствует о близости магмы к поверхности.

Для решения задачи измерения газового состава вулканических выбросов, в 2021 году был разработан портативный инструмент DEVI (Doas Expedition Volcanic Instrument) [2], позволяющий определять содержание газов в вулканических выбросах дистанционным методом DOAS (дифференциальная оптическая абсорбционная спектроскопия).

Инструмент DEVI показал свою работоспособность во время экспедиции на Курильские острова в период 31.07.2021–13.08.2021, где одной из задач было получение данных о газовом составе вулканических выбросов.

В то же время, первое использование DEVI в полевых условиях выявило ряд недостатков:

- высокий уровень собственного шума детектора;
- отсутствие фотопривязки спектра к объекту измерения в режиме реального времени.
- отсутствие возможности перезагрузки прибора без выключения питания периферийных модулей (например, GPS);
- нехватка внешних управляющих устройств (кнопок) для переключения режимов измерений.

Поэтому, перед очередной экспедицией на Курильские острова, DEVI подвергался некоторой модернизации (рис. 1) с целью устранить описанные выше недостатки.

Для устранения недостатков 3 и 4 прибор был оснащен дополнительными кнопками 4 на лицевой панели для возможности переключения режимов съемки (одиночный спектр, непрерывная съемка, темновой и опорный спектры) и кнопкой перезагрузки управляющего микроконтроллера 5. Для возможности ручного выбора времени экспо-