

## Применение комбинированных оптических методов для контроля процесса травления щелевой изоляции

А.Д. Волоховский<sup>1,2</sup>, Н.Н. Герасименко<sup>1,3</sup>, Д.С. Петраков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ОАО «Ангстрем-Т», г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева  
Российской академии наук, г. Москва, Россия

*rmta@miee.ru*

Процесс контроля технологической операции травления щелевой изоляции применяется в технологическом цикле производства КМОП-изделий. Для повышения оперативности и информативности этого контрольного процесса может быть применен метод оптической скаттерометрии, позволяющий заменить сразу несколько использовавшихся ранее методов.

С помощью размерной схемы, учитывающей реальные особенности процедуры, описан процесс травления щелевой изоляции. Представлены комбинированные методы контроля процесса щелевой изоляции. Исследованы границы применимости оптической скаттерометрии и рассмотрены методы, которые можно использовать вне этих границ, в частности в диапазоне менее ~20 нм.

Разработанная методика позволяет контролировать непосредственно в технологическом цикле не только линейный размер, но и глубину канавки травления и наклон ее стенок, которые ранее не контролировались. Контроль этих параметров в технологическом цикле снижает издержки производства и повышает надежность интегральных схем. Процесс опробован на примере технологии 180 нм, но обсуждаются возможности применения процесса для меньших проектных норм.

*Ключевые слова:* метрология; контроль процессов; скаттерометрия; травление; щелевая изоляция.

*Для цитирования:* Волоховский А.Д., Герасименко Н.Н., Петраков Д.С. Применение комбинированных оптических методов для контроля процесса травления щелевой изоляции // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 4. – С. 331–340. DOI: 10.24151/1561-5405-2017-22-4-331-340

## **Application of Optical Combined Methods to Control of Shallow Etching Process**

*A.D. Volokhovskiy<sup>1,2</sup>, N.N. Gerasimenko<sup>1,3</sup>, D.S. Petrakov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*National Research University of Electronic Technology,  
Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*JSC Angstrom-T, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia*

*rmta@miee.ru*

Production CMOS technology node shallow trench isolation (STI) etching process control has been discussed in the present paper. It has been shown that optical scatterometry can be adopted for that in order to increase throughput and informativity of the control. In addition, it has been shown that scatterometry can replace a number of currently used techniques.

The process of model suitable for the STI application creation has been discussed. A number of cross-control techniques is used to enable scatterometry for the discussed application. The application limits of the optical scatterometry are developed and techniques for control of the nodes beyond these limits have been discussed. In particular, process of CD control beyond 20 nm node has been discussed.

The model created enables the control of not only the width of the trench but also its depth and sidewall angle. Those additional parameters were not controlled in-line previously and it helped to reduce production cost and increase the IC reliability. The control process has been tested on the CMOS 180 nm technology node, but its adoption to smaller nodes has been discussed.

*Keywords:* metrology; process control; scatterometry; etching; shallow trench isolation.

*For citation:* Volokhovskiy A.D., Gerasimenko N.N., Petrakov D.S. Application of Optical Combined Methods to Control of Shallow Etching Process // Proc. of Universities. Electronics. – 2017. – Vol. 22. – No. 4. – P. 331–340. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-4-331-340

**Введение.** Щелевая изоляция [1] применяется в современной КМОП-технологии для разграничения активных транзисторных областей в ИС. Размеры структуры определяют степень интеграции технологии. Линейные размеры и глубина канавок щелевой изоляции в значительной степени связаны с надежностью и отказоустойчивостью ИС. Отметим, что формирование щелевой изоляции происходит на начальном этапе производства ИС. Отсутствие контроля на этом этапе существенно снижает выход годных изделий и экономическую эффективность всего технологического процесса.

Цель настоящей работы – разработка методики контроля процесса травления щелевой изоляции ИС для технологии производства КМОП-изделий уровня 180 нм и ниже, а также исследование нижней границы применимости данной методики.

**Метод оптической скаттерометрии.** В мировой практике современной микроэлектроники метод оптической скаттерометрии [2] используется для контроля процес-

сов формирования трехмерных структур. Метод позволяет анализировать картины дифракции от периодических структур с целью восстановления их пространственных профилей. Метод оптической скаттерометрии строится на базе стандартной интерферометрической техники, такой как эллипсометрия, и получил распространение в связи с развитием последней. С помощью эллипсометрии исследуется изменение состояния поляризации электромагнитной волны при прохождении или отражении от образца, которое является функцией как параметров образца, так и параметров используемого излучения:

$$\operatorname{tg}(\Psi) \cos(\Delta) = \frac{R_p}{R_s} = f(t, n, k, \lambda, \varphi),$$

где  $\operatorname{tg}(\Psi)$ ,  $\cos(\Delta)$  – основные эллипсометрические величины ( $\operatorname{tg}(\Psi)$  пропорционален соотношению амплитуд  $s$ - и  $p$ -поляризованных волн, а  $\cos(\Delta)$  – разности фаз между ними [3]);  $R_p$ ,  $R_s$  – соответственно комплексные коэффициенты отражения для  $p$ - и  $s$ -поляризованных волн;  $t$  – толщина пленки;  $n$ ,  $k$  – соответственно показатель преломления и коэффициент затухания материала пленки;  $\lambda$  – длина волны зондирующего излучения;  $\varphi$  – угол падения излучения на образец.

Для лазерной эллипсометрии с фиксированным углом падения, широко применявшейся ранее, характерно ограничение, связанное с невозможностью измерения более одного параметра образца. Так, например, при измерении толщины пленки требуется с хорошей точностью знать значение ее показателя преломления. В настоящее время получила развитие спектральная эллипсометрия [4], позволяющая регистрировать изменение состояния поляризации электромагнитной волны в широком диапазоне энергий. Это позволяет снять ограничения, присущие традиционной эллипсометрии, и использовать ее для измерения сложных структур и нахождения сразу нескольких параметров этих структур. Однако для этого необходимо с высокой точностью знать дисперсионные зависимости показателя преломления и коэффициента затухания в исследуемом спектральном диапазоне для всех материалов образца.

Для регистрации экспериментальной информации методом оптической скаттерометрии используется техника спектральной эллипсометрии, с помощью которой измерение проводится непосредственно внутри периодически повторяющейся топологии на образце. Топология в данном случае представляет собой дифракционную решетку и изготавливается непосредственно в контролируемом технологическом процессе, например при травлении канавок щелевой изоляции. Отличие скаттерометрии от спектральной эллипсометрии состоит в используемом математическом аппарате [5], который позволяет по полученной картине дифракции восстановить профиль исследованной решетки. Однако для применения метода скаттерометрии сначала необходимо с хорошей точностью охарактеризовать геометрические параметры решетки на образце и принять во внимание диапазоны возможных изменений этих параметров при многократных реализациях технологических процессов. Необходимые размеры решетки определяются размером светового пятна на образце и точностью позиционирования этого пятна. Для современных приборов эти размеры могут составлять порядка  $50 \times 50$  мкм [6], что позволяет встроить контрольную площадку в дорожку скрайбирования между кадрами мультипликации, не занимая дополнительной полезной площади на пластине. В мировой практике метод оптической скаттерометрии получил широкое распространение при переходе на малые топологические нормы [2, 7], так как характеризуется вы-

сокой производительностью и точностью [6] и позволяет заменить сразу несколько традиционных средств контроля.

Скаттерометрия активно применяется для контроля критических размеров в фотолитографических процессах [8] и процессах травления [2, 7]. В настоящее время российские микроэлектронные предприятия активно переходят на технологические нормы порядка  $\leq 100$  нм и поэтому начинают внедрять метод оптической скаттерометрии в качестве средства эффективного контроля технологических процессов.

**Комбинированные оптические методы контроля.** Для пленок, оптические свойства которых зависят от режима их получения, в [9] экспериментально получены дисперсионные зависимости этих величин с помощью комбинированных методов и построена геометрическая схема образца. Предлагаемая и проверенная в реальном технологическом цикле схема контроля процесса травления щелевой изоляции с использованием метода оптической скаттерометрии по разрешающей способности и воспроизводимости сравнима или превосходит растровую электронную микроскопию (РЭМ) [10, 11], а по производительности многократно превосходит ее.

Основой контроля технологии является оперативная проверка геометрических размеров элементов ИС, а именно линейных размеров и глубины канавки щелевой изоляции, угла наклона ее стенок и толщины маски травления. В существующих технологических процессах такой контроль осуществляется с помощью РЭМ и атомно-силовой микроскопии (АСМ). Эти методы решают ряд задач, однако не позволяют повысить производительность операций контроля и ограничивают возможности применения за счет громоздкости и дороговизны оборудования (РЭМ), а также необходимости частой замены используемых комплектующих деталей (АСМ).

Предлагаемая комбинированная методика опробована при создании щелевой изоляции в процессе промышленного производства и показала возможность проведения одновременного контроля линейных размеров, глубины и угла наклона стенок протравливаемых канавок.

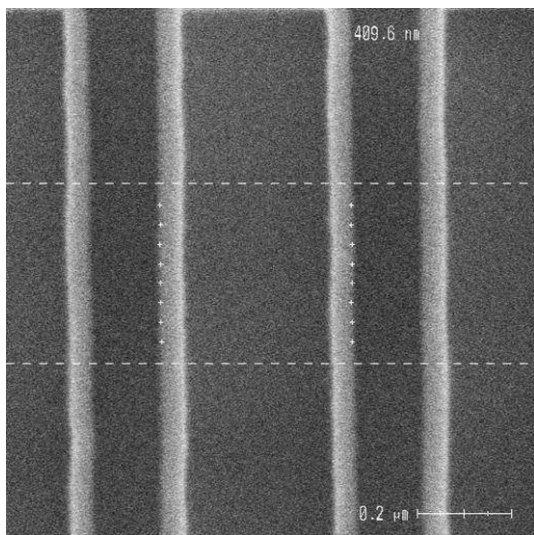


Рис.1. РЭМ-изображение канавок травления щелевой изоляции

Fig.1. SEM-image of the etched STI trenches for one of the control points. Width is specified on the image. Operation was excluded after modernization of control scheme with the usage of optical scatterometry combined technique

Обычно в технологическом цикле для контроля критического размера используется специализированный электронный микроскоп для измерения критических размеров CD-SEM (Critical Dimension Scanning Electron Microscope). Результат такого контроля для одной из точек представлен на рис.1. Данная операция исключена после модернизации операции контроля с применением комбинированной методики оптической скаттерометрии. Оценка глубины канавок травления и угла наклона ее стенок не проводится. Для оценки этих параметров из технологического цикла в лаборатории отбирался контрольный образец, который анализировался с помощью АСМ или РЭМ поперечного сечения. Решение о необходимости контроля принималось на основе результатов, полученных на этапе параметрического контроля электрофизическими методами, которые можно использовать только после формирования омических

контактов и первого уровня металлической разводки. Поэтому согласно существовавшей схеме контроля потенциально бракованная продукция могла проходить по технологическому маршруту половину и более производственного цикла. Разработанная методика позволяет характеризовать профиль канавки травления непосредственно после проведения операции травления щелевой изоляции. Переход к контролю внутри технологического цикла без привлечения внешних контрольных операций, связанных с выносом контрольных образцов из чистого производственного помещения, повышает оперативность контроля и уменьшает время реакции при выявлении бракованной продукции.

**Эксперимент.** Кремниевая пластина с кристаллографической ориентацией (100) окислялась термически до толщины 12–13 нм. Затем в диффузионной печи наносился нитрид кремния толщиной 160 нм.

Оптические параметры пленок, такие как дисперсионные зависимости показателей преломления  $n$  и поглощения  $k$  в рабочем спектральном диапазоне 250–800 нм, для скаттерометрической установки KLA-TENCORSpectraFX-200 являются справочными данными [12]. Однако для тонких пленок значения этих параметров могут отличаться от табличных. Как показал эксперимент, это особенно необходимо учитывать для пленки нитрида кремния. Поэтому для уточнения дисперсионных зависимостей оптических свойств нитрида кремния изготовлен отдельный образец пленки, осажденный на кремниевую подложку в режимах, аналогичных технологическому процессу формирования щелевой изоляции. Уточненные оптические зависимости, полученные комплементарным методом, предполагающим совместное использование спектральной эллипсометрии и рентгеновской рефлектометрии [9], а также для сравнения стандартные данные из [12] представлены на рис.2. Результирующие значения толщины пленок составили 159,1 нм для нитрида кремния и 12,8 нм для его оксида кремния. Эллипсометрические измерения и последующие скаттерометрические измерения выполнены на одной установке в одном месте контролируемой пластины.

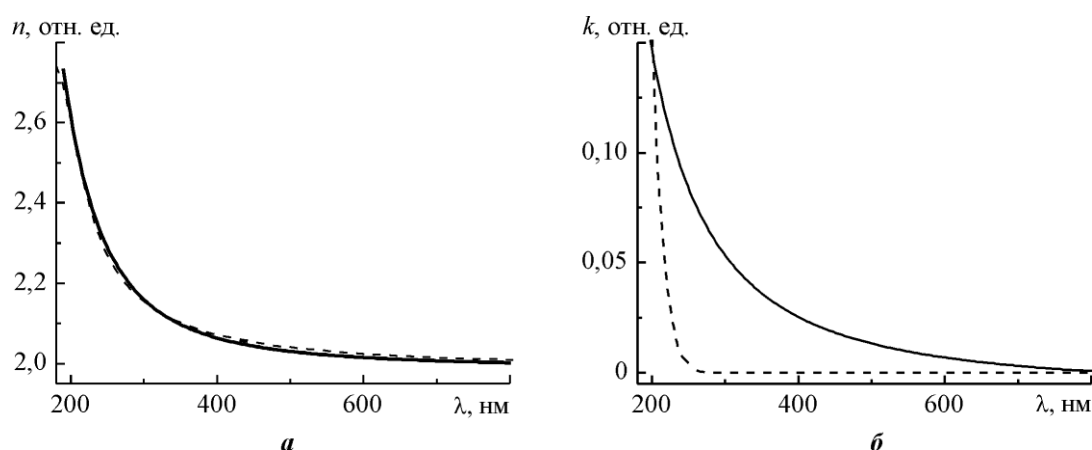


Рис.2. Дисперсионные зависимости коэффициентов преломления (а) и поглощения (б) пленки нитрида кремния: — стандартные дисперсионные модели для объемного материала; --- модели, рассчитанные с помощью комбинированной методики

Fig.2. The dispersion curves for refraction index (a) and extinction coefficient (b) for silicon nitride film. Solid curves – the standard dispersion curve for the bulk material, dotted line – calculated curve using the combined modeling methodology



На следующих этапах разработки процесса проводилась фотолитография по резистивной маске и многоступенчатое реактивное ионное травление. Ширина фотолитографических резистивных линий составляла 360 нм, шаг (период) равен 580 нм. Ионному травлению сначала подвергался нитрид и оксид кремния, затем – кремний. Ширина канавки травления по верхней границе составляла 220 нм, по нижней – 140 нм, глубина канавки равна 360 нм. Точные значения геометрических параметров структуры определялись с помощью РЭМ на подготовленном заранее поперечном сечении (рис.3,а). Для слоя нитрида кремния боковые стенки практически вертикальны, а для канавок травления в кремнии угол наклона стенок составлял 80–85°.

Для построения схемы исследуемой структуры, содержащей ее геометрические и оптические параметры (рис.3,б), использовалось специальное программное обеспечение KLA-TencorAcushare 1.0. Для получения корректного результата расчета с учетом возможных взаимных корреляций параметров, а также диапазонов реальной вариативности технологических процессов, полученных статистически, выбраны следующие границы допустимого изменения геометрических параметров схемы исследуемой структуры: размер нижнего основания канавки щелевой изоляции составлял от 350 до 580 нм, верхнего – от 300 до 500 нм, глубины канавки – от 300 до 450 нм.

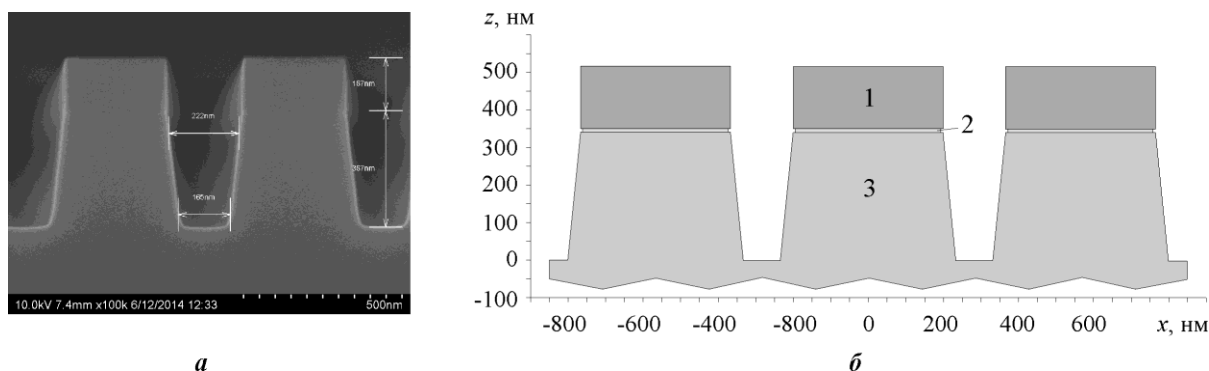


Рис.3. РЭМ-изображение поперечного сечения исследуемой структуры щелевой изоляции (а) и построенная и рассчитанная геометрическая модель периодически повторяющейся ячейки исследуемой структуры щелевой изоляции (б): 1 – нитрид кремния; 2 – оксид кремния; 3 – монокристаллический кремний

Fig.3. Cross sectional SEM-image of the studied STI structure (a). Designed opto-geometric model of one periodically repeating cell of the investigated STI structure (b): 1 – silicon nitride; 2 – oxide; 3 – monocrystalline silicon

**Результаты и их обсуждение.** В таблице представлены результаты сравнения данных контроля с помощью РЭМ, эллипсометрии и скаттерометрии. Хорошее совпадение результатов является свидетельством точности применяемой методики и разработанной оптико-геометрической схемы. Задача решалась с использованием генетического алгоритма для нахождения локального минимума функции невязки [5, 13]. Решение задачи оптимизации размерных параметров заданной геометрической модели при расчете на используемом вычислительном кластере из 42 процессоров IntelXEON E5440 занимает менее 30 с, что соответствует необходимым требованиям и позволяет проводить экспресс-контроль технологических процессов микроэлектронного производства. Результат моделирования по итогам подгонки теоретических и экспериментальных кривых представлен на рис.4. Измеренные и рассчитанные коэффициенты скаттерометрии  $\alpha = \cos(2\Psi)$  и  $\beta = \sin(2\Psi) \cdot \cos(\Delta)$  прямо связаны с эллипсометрическими параметрами  $\Psi$  и  $\Delta$  [3, с. 15].

Результаты измерения элементов структуры щелевой изоляции  
The results of measurement of the STI elements obtained

Параметр	Метод измерения			
	Скаттеро-метрия	Эллипсо-метрия	РЭМ поперечного сечения структуры	РЭМ в плоскости
Размер канавки травления по нижней границе кремния, нм	170	-	165	170,6
Размер канавки травления по верхней границе кремния, нм	269	-	222	-
Размер канавки по верхней границе нитридной пленки, нм	314	-	312	-
Глубина канавки травления, нм	351	-	367	-
Угол наклона стенки кремния, град.	83,7	-	85,6	-
Толщина подслоя окисла, нм	12,5	12,7	167 (общая)	-
Толщина слоя нитрида, нм	160,5	159,1		-

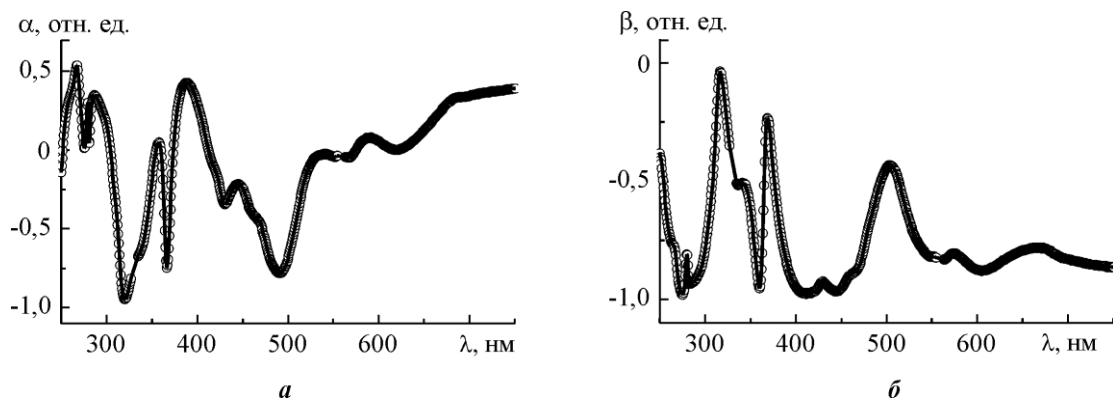


Рис.4. Спектральные зависимости скаттерометрических параметров  $\alpha$  (а) и  $\beta$  (б):

○—○—○ эксперимент; — расчет

Fig.4. The spectral dependence of ellipsometric parameters  $\alpha$  (a) and  $\beta$  (b).

Experimental data – points, calculated curves – solid curves

**Закключение.** Разработанная методика позволяет контролировать не только линейный размер, но и глубину канавки травления и наклон ее стенок, т.е. те параметры, контроль которых ранее в технологическом цикле был невозможен. Методика характеризуется важными для потокового производства качествами, среди которых высокая производительность, точность и оперативность получения результата.

Использованная в данном исследовании скаттерометрическая установка может применяться для контроля критических размеров вплоть до технологического уровня 45 нм. Это связано со спектральным диапазоном 250–800 нм, который ограничен источником – ксеноновой лампой, а также характеристиками пропускания оптических элементов. Применение техники оптической скаттерометрии для меньших проектных норм может быть реализовано за счет перехода в более коротковолновую часть спектра. Например, дейтериевый источник имеет типичный спектральный диапазон 150–400 нм, что позволит проводить контроль критических размеров вплоть до технологии 22 нм [14]. Дальнейшее снижение спектрального диапазона для скаттерометрических установок представляется проблематичным, так как это потребует вакуумирования оптического тракта, использования сверхчистого азота для его постоянной

продувки либо других технических решений, которые приведут к резкому росту стоимости установки.

В настоящее время ведущие мировые производители метрологического оборудования разрабатывают рентгеновские средства измерения критических размеров. В частности, японская компания Rigaku [15] работает над созданием установки для измерения критических размеров посредством анализа картин малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (CD-SAXS). Такая установка может применяться на технологических уровнях 10 нм и ниже.

Наиболее целесообразно для контроля как малоразмерных элементов, так и других элементов ИС комплексное использование метода оптической скаттерометрии и рентгеновского метода, возможности и ограничения которого должны быть исследованы дополнительно.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 15-19-10054).*

### *Литература*

1. **Liou F.-T., Chen F.E.** Method for forming planarized shallow trench isolation in an integrated circuit and a structure formed thereby // Patent US N 5130268 A. 1992.
2. Review of CD measurement and scatterometry / **P. Thony, D. Herisson, D. Henry et al.** // Proceedings of the Characterization and Metrology for VLSI Technology. – 2003. – P. 381–388.
3. **Tompkins H.G., Irene E.A.** Handbook of ellipsometry. – William Andrew Publishing, NY and Springer-Verlag GmbH, Heidelberg. – 2005. – 891 p.
4. Broadband spectral operation of a rotating-compensator ellipsometer / **J. Opsal, J. Fanton, J. Chen et al.** // Thin Solid Films. – 1998. – Vol. 313–314. – P. 58–61.
5. **Opsal J., Chu H.** Fundamental solutions for real-time optical CD metrology // Proceedings of SPIE. – 2002. – Vol. 4689. – P. 163–176.
6. Through Pitch monitoring by optical scatterometry/ **R. Melzer, C. Hartig, G. Grasshoff et al.** // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9424. – P. 942429-1 – 942429-9.
7. Fast and accurate scatterometry metrology method for STI CMP stepheight process evaluation / **C.-H. Lina, C. Huang, C.-L. Hsu et al.** // Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8324. – P. 832421-1 – 832421-8.
8. Nondestructive analysis of lithographic patterns with natural lineedge roughness from Mueller matrix ellipsometric data / **X. Chen, Y. Shi, H. Jiang et al.** // Applied Surface Science. – 2016. – Vol. 388. – P. 524–530.
9. Problems in measurements of parameters of elements and structures in modern micro- and nanoelectronics considering TiN/Ti diffusion barrier structures as an example / **D.I. Smirnov, R.M. Giniyatyllin, I.Yu. Zyl'kov et al.** // Technical Physics Letters. – 2013. – Vol. 39. – No 7. – P. 34–42.
10. **Sullivan N., Dixon R., Bunday B.** Electron beam metrology of 193 nm resists at ultra-low voltage // Proceedings of SPIE. – 2003. – Vol. 5038. – P. 483–492.
11. Modeling of line roughness and its impact on the diffraction intensities and the reconstructed critical dimensions in scatterometry / **H. Gross, M.-A. Henn, S. Heidenreich et al.** // Applied Optics. – 2012. – Vol. 51. – No 30. – P. 7384 – 7394.
12. **Palik E.D.** Handbook of optical constants of solids // Academic Press. – 1998. – 999 p.
13. Comparison of algorithms used for evaluation of ellipsometric measurements Random search, genetic algorithms, simulated annealing and hill climbing graph-searches / **O. Polgár, M. Fried, T. Lohner et al.** // Surface Science. – 2000. – Vol. 457. – P. 157–177.
14. Accurate and reliable optical CD of MuGFET down to 10nm / **P. Leray, G.F. Lorusso, S. Cheng et al.** // Proceedings of SPIE. – 2003. – Vol. 6518. – P. 65183B-1–65183B-10.
15. **Ito Y., Higuchi A., Omote K.** Characterization of cross-sectional profile of resist L/S and holepattern using CD-SAXS // Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol. 9778. – P. 97780L-1–97780L-8.

Поступила 29.03.2017 г.; принята к публикации 25.04.2017 г.



**Волоховский Александр Дмитриевич** – ведущий инженер отдела технологических процессов ОАО «Ангстрем-Т» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский пр-т, д. 7), аспирант кафедры квантовой физики и нанoeлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), [rmta@miee.ru](mailto:rmta@miee.ru)

**Герасименко Николай Николаевич** – доктор физико-математических наук, профессор, начальник лаборатории радиационных методов технологии и анализа Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), ведущий научный сотрудник лаборатории рентгенооптических методов диагностики наноструктур Физического института им. П.Н.Лебедева Российской академии наук (Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 53), [rmta@miee.ru](mailto:rmta@miee.ru)

**Петраков Дмитрий Сергеевич** – инженер лаборатории радиационных методов технологии и анализа, аспирант кафедры квантовой физики и нанoeлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), [rmta@miee.ru](mailto:rmta@miee.ru)

### References

1. Liou F.-T., Chen F.E. *Method for forming planarized shallow trench isolation in an integrated circuit and a structure formed thereby*. US Patent N 5130268 A, 1992.
2. Thony P., Herisson D., Henry D. et al. Review of CD measurement and scatterometry. *Proceedings of the Characterization and Metrology for VLSI Technology*, 2003, pp. 381–388.
3. Tompkins, H.G., Irene, E.A. *Handbook of Ellipsometry*. William Andrew Publishing, NY and Springer-Verlag GmbH, Heidelberg, 2005. 891 p.
4. Opsal J., Fanton J., Chen J. et al. Broadband spectral operation of a rotating-compensator Ellipsometer. *Thin Solid Films*, 1998, vol. 313–314, p.58.
5. Opsal, J., Chu, H. Fundamental solutions for real-time optical CD metrology. *Proceedings of SPIE*, 2002, vol. 4689, pp. 163–176.
6. Melzer R., Hartig C., Grasshoff G. et al. Through Pitch monitoring by optical scatterometry. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9424, pp. 942429-1–942429-9.
7. Lina C.-H., Huang C., Hsu C.-L. et al. Fast and accurate scatterometry metrology method for STI CMP stepheight process evaluation. *Proceedings of SPIE*, 2012, vol. 8324, pp. 832421-1–832421-8.
8. Chen X., Shi Y., Jiang H. et al. Nondestructive analysis of lithographic patterns with natural lineedge roughness from Mueller matrix ellipsometric data. *Applied Surface Science*, 2016, vol. 388, pp. 524–530.
9. Smirnov D.I., Giniyatyllin R.M., Zyl'kov I.Yu. et al. Problems in measurements of parameters of elements and structures in modern micro- and nanoelectronics considering TiN/Ti diffusion barrier structures as an example. *Technical Physics Letters*, 2013, vol. 39, no.7. pp. 34–42.
10. Sullivan N., Dixon R., Bunday B. Electron beam metrology of 193 nm resists at ultra-low voltage. *Proceedings of SPIE*, 2003, vol. 5038, pp. 483–492.
11. Gross H., Henn M.-A., Heidenreich S. et al. Modeling of line roughness and its impact on the diffraction intensities and the reconstructed critical dimensions in scatterometry. *Applied Optics*, 2012, vol. 51, no. 30, pp. 7384–7394.
12. Palik E.D. *Handbook of optical constants of solids*. Academic Press, 1998. 999 p.
13. Polgár O., Fried M., Lohner T. et al. Comparison of algorithms used for evaluation of ellipsometric measurements Random search, genetic algorithms, simulated annealing and hill climbing graph-searches. *Surface Science*, 2000, vol. 457, pp. 157–177.
14. Leray P., Lorusso G.F., Cheng S. et al. Accurate and Reliable Optical CD of MuGFET down to 10 nm. *Proceedings of SPIE*, 2003, vol. 6518, pp. 65183B-1–65183B-10.
15. Ito Y., Higuchi A., Omote K. Characterization of cross-sectional profile of resist L/S and holepattern using CD-SAXS. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9778, pp. 97780L-1–97780L-8.

Submitted 29.03.2017; accepted 25.04.2017 .

**Volokhovskiy Alexander D.** – senior metrology applications engineer SC «Angstrom-T» (124498, Moscow, Zelenograd, Georgiyevskiy prosp., 7), PhD student of the Quantum Physics and Nanoelectronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), [rmta@miee.ru](mailto:rmta@miee.ru)

**Gerasimenko Nikolay N.** – doctor of physico-mathematical sciences, professor, chief of laboratory of Radiation Methods of Technology and Analysis, National Research University of Electronic Technology, leading researcher (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), laboratory X-ray Methods of Nanostructure Diagnostics, P.N. Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences (Russia, 119991, Moscow, Leninsky prosp., 53), [rmta@miee.ru](mailto:rmta@miee.ru)

**Petrakov Dmitry S.** – postgraduate of the Quantum Physics and Nanoelectronics Department, engineer of second category of laboratory of Radiation Methods of Technology and Analysis, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), [rmta@miee.ru](mailto:rmta@miee.ru)

### **Опечатки**

В журнале «Известия высших учебных заведений. Электроника» Т.22, №3, 2017 в статье Сергеева В.А., Фролова И.В., Широкова А.А., Радаева О.А. «Закономерности изменения внешней квантовой эффективности InGaN/GaN зеленых светодиодов в процессе ускоренных испытаний» на стр. 221 следует читать:

*Для цитирования:* Сергеев В.А., Фролов И.В., Широков А.А., Радаев О.А. Закономерности изменения внешней квантовой эффективности InGaN/GaN зеленых светодиодов в процессе ускоренных испытаний // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т.22. – №3. – С. 220–230.

*For citation:* Sergeev V.A., Frolov I.V., Shirokov A.A., Radaev O.A. Regularities of Change of External Quantum Efficiency of InGaN/GaN Green Light Emitting Diodes in Accelerated Testing Process // Proc. of universities. Electronics. – 2017. – Vol.22. – №3. – P. 220–230.