

нельзя перейти от одного решения к другому путем непрерывной деформации профиля графика функции. Например, в случае решений (2) и (4) потребовался бы переход от функции секанса к функции гиперболического тангенса, что сделать не удастся, т.к. эти функции по-разному ведут себя на пространственной бесконечности.

То, что решения (2) и (4) принадлежат к различным топологическим классам, указывает что, соответствующие нервные импульсы в биологической системе существуют по-отдельности и не могут встречаться одновременно.

#### Литература

1. Lautrup, B. The stability of solitons in biomembranes and nerves / B. Lautrup, A. D. Jackson and T. Heim

burg [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://xxx.lanl.gov> (arXiv: physics/05101[physics.bio-ph]).

2. Hodgkin, A. L. Quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve / A. L. Hodgkin and A. F. Huxley // J. Physiol. – 1952. – Vol. 117. – P. 500–544.

3. Heimburg, T. On soliton propagation in biomembranes and nerves / T. Heimburg and A. D. Jackson // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 2005. – Vol. 102. – P. 9790–9795.

4. Уизем, Дж. Линейные и нелинейные волны / Дж. Уизем. – Москва: Мир, 1977. – 624 с.

5. Солитоны и нелинейные уравнения / Р. Додд [и др.]. – Москва: Мир, 1988. – 694 с.

6. Князев, М. А. Кинки в скалярной модели с затуханием / М. А. Князев. – Минск: Тэхналогія, 2003. – 115 с.

7. Раджараман, Р. Солитоны и инстантоны в квантовой теории поля / Р. Раджараман. – Москва: Мир, 1985. – 416 с.

УДК 538.915

### ВЛИЯНИЕ ВЕРХНЕГО ОКСИДНОГО СЛОЯ В ОПТИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРАХ НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ

Пархоменко И.Н.<sup>1</sup>, Власукова Л.А.<sup>1</sup>, Комаров Ф.Ф.<sup>2</sup>, Романов И.А.<sup>1</sup>, Альжанова А.Е.<sup>3</sup>  
Демидович С.А.<sup>4</sup>, Ковальчук Н.С.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет

<sup>2</sup>НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ

<sup>3</sup>Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан

<sup>4</sup>ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл»,

Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Структуры  $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$  и  $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$  были изготовлены на кремниевых подложках методами химического осаждения (PECVD, LPCVD). Показано, что верхний слой оксида кремния защищает нижележащий нитридный слой от непреднамеренного окисления во время быстрого термического отжига в инертной среде (1100 °С, 3 мин). Кроме того, верхний слой оксида кремния увеличивает выход фотолюминесценции от слоя нитрида кремния в три раза. Обсуждается различие слоев оксида кремния, образующегося при высокотемпературном отжиге  $\text{SiN}_x$  и слоя  $\text{SiO}_2$ , нанесенного на слой нитрида кремния методом PECVD.

**Ключевые слова:** нитрид кремния, оксид кремния, быстрый термический отжиг, ИК-спектроскопия, фотолюминесценция.

### THE EFFECT OF UPPER OXIDE LAYER IN OPTICAL CAPACITOR BASED ON SILICON NITRIDE

Vlasukova L.<sup>1</sup>, Parkhomenko I.<sup>1</sup>, Komarov F.<sup>2</sup>, Romanov I.<sup>1</sup>, Alzhanova A.<sup>3</sup>, Demidovich S.<sup>4</sup>, Kovalchuk N.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University

<sup>2</sup>A.N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems of Belarusian State University

<sup>3</sup>L.N. Gumilev Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhtan

<sup>4</sup>Joint Stock Company "Integral"

Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** The  $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$  and  $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$  structures were fabricated on silicon substrates by chemical vapour deposition (PECVD, LPCVD). It was shown that top silicon oxide layer protects underlying nitride layer from unintended oxidation during rapid thermal annealing in inert ambient (1100 °C, 3 min). Furthermore, upper silicon oxide layer enhances photoluminescence yield from silicon nitride layer in three times. The difference of silicon oxide layer unintentionally formed on  $\text{SiN}_x$  film during high-temperature annealing silicon oxide layer deposited on  $\text{SiN}_x$  by PECVD has been discussed.

**Key words:** silicon nitride, silicon oxide, rapid thermal annealing, IR spectroscopy, photoluminescence.

Адрес для переписки: Власукова Л.А., ул. Курчатова, 5, Минск 220045, Республика Беларусь

e-mail: vlasukova@bsu.by

**Введение.** Нитрид кремния является основным материалом для создания пассивирующих и барьерных слоев в интегральных микросхемах.

Благодаря широкому спектральному диапазону прозрачности, светоизлучающим свойствам, сверхвысокой добротности нитрид кремния

также применяется в качестве волновода, просветляющего покрытия солнечных элементов, активного слоя лазеров и устройств энергонезависимой памяти [1, 2]. В основном, для этих приложений используются слоистые структуры типа  $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ , что позволяет улучшить термическую стабильность, пассивацию поверхности, устойчивость к потенциальной деградации и др.

Известно, что естественное окисление нитридных пленок может приводить к резкому ухудшению их диэлектрических свойств. В работе предлагается использовать пленку PECVD-оксида кремния в качестве защитного слоя для предотвращения непреднамеренного окисления нитрида кремния при термообработках. С этой целью обсуждается влияние отжига на свойства двухслойных структур «нитрид/оксид» и трехслойных структур «оксид/нитрид/оксид».

**Материалы и методы исследования.** Двухслойные  $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$  и трехслойные  $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$  пленки суммарной толщиной 79 и 147 нм соответственно были нанесены на Si подложку методами LPCVD и PECVD. После нанесения часть образцов отжигалась в установке быстрого термического отжига (БТО) (1200 °С, 3 мин) в Ar.

Структурный и элементный анализ, оптические свойства сформированных структур изучались методами резерфордского обратного рассеяния (РОР), растровой электронной микроскопии (РЭМ), инфракрасной (ИК) и оптической спектроскопии, и фотолюминесценции (ФЛ).

**Результаты и обсуждение.** Анализ методом РОР показал, что элементный состав слоев оксида и нитрида кремния близок к стехиометрическому:  $\text{SiO}_{1.9}$  и  $\text{SiN}_{1.3}$  соответственно.

На рис. 1 представлены ИК-спектры поглощения двухслойной и трехслойной структур до и после БТО. Во всех спектрах наблюдаются полосы при  $\sim 850 \text{ см}^{-1}$  и  $1050\text{-}1070 \text{ см}^{-1}$ , обусловленные соответственно валентными колебаниями связей Si–N и Si–O [3]. В случае структуры  $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$  БТО приводит к увеличению оптической плотности в области колебаний связи Si–O. С учетом рассчитанного значения коэффициента поглощения для оксида кремния данное возрастание интенсивности полосы объясняется увеличением толщины  $\text{SiO}_x$  примерно на 25 нм. В случае структуры  $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$  наблюдается незначительное увеличение и высокочастотный сдвиг данной полосы, свидетельствующий об увеличении содержания кислорода в пленке (от  $\text{SiO}_{1.9}$  до  $\text{SiO}_2$ ). Таким образом, при высокотемпературном БТО происходит непреднамеренное окисление не защищенного оксидом слоя нитрида кремния, вероятнее всего, из-за наличия примесей кислорода и воды в используемом аргоне.

Для подтверждения окисления слоя  $\text{SiN}_x$  в двухслойной структуре были промоделированы спектры отражения двухслойной структуры до и

после БТО (рис. 2). Хорошее совпадение экспериментального и модельного спектров для неотожженного образца было получено при использовании в качестве модельного материала структуры  $\text{Si}_3\text{N}_4(63 \text{ нм})/\text{SiO}_2(16 \text{ нм})/\text{Si}$ , что согласуется с данным РЭМ. Для структуры после отжига результаты моделирования и эксперимента совпадают при соотношении толщин  $\text{SiO}_2(23 \text{ нм})/\text{Si}_3\text{N}_4(58 \text{ нм})/\text{SiO}_2(18 \text{ нм})/\text{Si}$ . Таким образом, спектры оптического отражения указывают на уменьшение толщины пленки  $\text{SiN}_x$  и общее увеличение верхнего и нижнего слоев оксида кремния на 25 нм, что согласуется с данными ИК-спектроскопии.

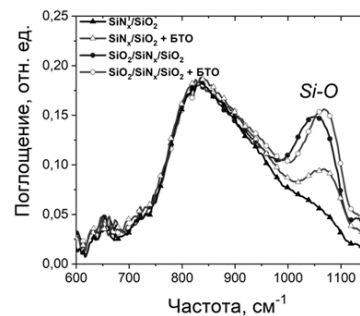


Рисунок 1 – Спектры ИК-поглощения структур  $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$  и  $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$  до и после БТО

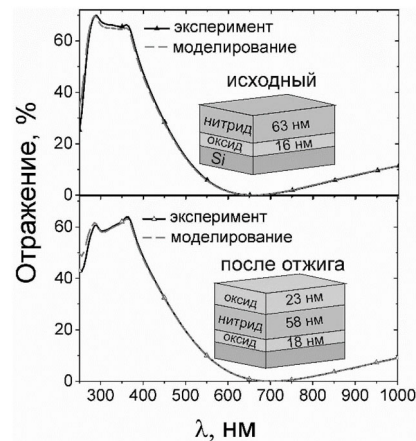


Рисунок 2 – Экспериментальные (сплошные кривые) и моделированные (пунктирные кривые) спектры отражения структуры  $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$  после осаждения и БТО. На вставках показаны соответствующие структуры, используемые при моделировании

Методом ФЛ показано, что при одинаковой толщине светоизлучающего слоя нитрида кремния сигнал свечения от трехслойной структуры  $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$  в 3 раза интенсивнее по сравнению с двухслойной структурой  $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$  благодаря интерференционным эффектам. Тем не менее, БТО приводит к уменьшению сигнала ФЛ для обеих структур  $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ . (в 2,6 раза) и  $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$  (в 1,9 раза) за счет аннигиляции дефектных состояний в нитриде кремния.

**Заключение.** На основе данных РЭМ, ИК- и оптической спектроскопии показано, что БТО при

1200 °С приводит к окислению нитридного слоя в случае двухслойной структуры  $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$  в то время, как нитридный слой в трехслойной структуре  $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$  не подвержен окислению. Продемонстрировано, что трехслойная структура характеризуется более сильным (в ~3 раза) сигналом фотолюминесценции от нитридного слоя, чем двухслойная.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» (задание 3.8.1), а также гранта молодых ученых по

проекту «Жас галым» на 2022-2024 гг. МОН РК, ИРН объекта: AP14972733.

#### Литература

1. Low-temperature and low-pressure silicon nitride deposition by ecr-pecvd for optical waveguides / D. B. Bonneville [et al.] // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. – P. 2110.

2. Hegedüs, N. Silicon nitride and hydrogenated silicon nitride thin films: A review of fabrication methods and applications / N. Hegedüs, K. Balázs, C. Balázs // Materials. – 2021. – Vol. 14. – P. 5658.

УДК 681.322

### ПРОГРАММИРОВАНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ В ATMEL STUDIO И ARDUINO IDE

Кондратьева Н.А., Линкевич С.В., Плиско Р.Г.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** В данной статье рассматривается пример практической реализации программирования микроконтроллеров в ATMEL STUDIO. Описаны некоторые алгоритмы, предназначенные для создания и загрузки программ на ARDUINO-совместимые платы микроконтроллера.

**Ключевые слова:** микроконтроллер, микросхема, системы автоматического управления, программирование, печатная плата.

### PROGRAMMING MICROCONTROLLERS IN ATMEL STUDIO AND ARDUINO IDE. CREATING

Kondratieva N., Linkevich S., Plisko R.

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** This article discusses an example of the practical implementation of micro-controller programming in ATMEL STUDIO. Some algorithms designed to create and load programs on ARDUINO-compatible microcontroller boards are described.

**Key words:** microcontroller, microchip, automatic control systems, programming, printed circuit board.

*Адрес для переписки: Кондратьева Н.А., пр. Независимости, 65, Минск 220013, Республика Беларусь  
e-mail: kondratyeva@bntu.by*

В настоящее время микроконтроллеры используются во всех сферах жизнедеятельности человека, во многих современных устройствах. Они отличаются простотой подключения и большими функциональными возможностями. С помощью программирования микроконтроллера можно решить многие практические задачи аппаратной техники. Микроконтроллер представляет собой компьютер, размещившийся в одной микросхеме. Его основные достоинства: малые габариты, высокая производительность, надежность, способность быть адаптированным для выполнения разнообразных задач. Основное назначение микроконтроллера – использование в системах автоматического управления, встроенных в самые различные устройства: кредитные карточки, сотовые телефоны, фотоаппараты, музыкальные центры, телевизоры, видеокамеры, стиральные машины, микроволновые печи, системы охранной сигнализации, холодильники, новогодние гирлянды, компьютеры, системы зажигания бензиновых двигателей, электроприводы локомоти-

вов, ядерные реакторы и др. Применение микроконтроллеров можно разделить на два этапа: первый - программирование, когда пользователь разрабатывает программу и прошивает ее непосредственно в кристалл, и второй – согласование спроектированных исполнительных устройств с программируемым микроконтроллером. На первом этапе отладки программы значительно облегчает действия симулятор, который наглядно моделирует работу микропроцессора [1].

Для программирования AVR микроконтроллеров существует немало средств разработки, однако, наиболее популярным считается пакет Atmel Studio. Это бесплатный пакет, который объединяет в себе текстовый редактор, ассемблер и симулятор, используется совместно с аппаратными средствами отладки. Atmel Studio является интегрированной платформой разработки, которая предоставляет возможность проектировать и отлаживать приложения, разработанные для микроконтроллеров Atmel на базе архитектуры ARM процессоров серии Cortex-M. Atmel Studio предоставляет воз-