

## **ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

о диссертанте **НЕРАДОВСКОМ Максиме Михайловиче** при работе над диссертацией

### **СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ С РЕГУЛЯРНОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ ПРЕДСТАВЛЕННОЙ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ**

кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.07 – физика конденсированного состояния

Нерадовский М.М. в 2012 году окончил магистратуру физического факультета института естественных наук Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина по направлению «Нанотехнологии». В том же году он поступил в очную аспирантуру на кафедру компьютерной физики ИЕН УрФУ. Тематика научно-исследовательской работы Нерадовского М.М. связана с комплексным исследованием влияния волноводов, полученных различными вариантами метода протонного обмена, на параметры доменной структуры и на кинетику доменов при переключении поляризации в ниобате лития.

Диссертационная работа выполнена в рамках соглашения на написание диссертации под двойным научным руководством между Университетом Ниццы - Софии Антиполис в лаборатории физики конденсированного состояния и Уральским федеральным университетом имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в лаборатории сегнетоэлектриков отдела оптоэлектроники и полупроводниковой техники Института естественных наук с использованием оборудования Уральского ЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ в рамках исследований, проводимых при частичной поддержке несколькими грантами РФФИ, Российского научного фонда, Министерства образования и науки РФ.

Нерадовский М. М. имеет 35 публикаций по теме диссертации, включая 5 статей в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК и 30 тезисов Всероссийских и международных конференций.

Нерадовский М. М. получил стипендию правительства Франции в 2013-2014 гг., 2014-2015 гг. и 2015-2016 гг., стипендию Президента РФ для аспирантов, обучающихся по направлениям подготовки, соответствующим приоритетным направлениям модернизации и технологического развития российской экономики РФ в 2015-2016 гг., является победителем конкурса на проведение научных исследований аспирантами и магистрантами Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в 2012-2013 гг.

К настоящему времени Нерадовским М. М. на основе детального изучения различных вариантов проведения процесса протонного обмена и особенностей кинетики доменной структуры в ниобате лития с волноводами при переключении поляризации приложением внешнего электрического поля и при помощи сфокусированного электронного луча, был получен ряд оригинальных и значимых результатов. Впервые обнаружена деградация регулярной доменной структуры, за счет образования нанодоменов глубиной до 15 мкм в градиентных канальных волноводах после завершения протонного обмена. Показано, что уменьшение градиента в волноводе позволяет избежать деградации. Впервые обнаружено гигантское уменьшение порогового поля зародышеобразования в градиентных волноводах, которое вызвано формированием в приповерхностном слое незаэкранированного деполяризующего поля. Выявлено дискретное переключение поляризации в ниобате лития со ступенчатыми планарными волноводами, вызванное уменьшением эффективности внешнего экранирования деполяризующих полей, а также формирование и рост доменных лучей при наличии градиента поляризации, вызванные неэффективным объемным экранированием. Обнаружен эффект изотропного роста доменов при облучении сфокусированным электронным лучом ниобата лития с градиентным планарным волноводом, обусловленный слиянием растущего домена с изолированными нанодоменами. Продемонстрирована возможность создания регулярной доменной структуры сфокусированным электронным лучом в ниобате лития с канальными SPE волноводами, и получена генерация второй гармоники лазерного излучения с длиной волны в полосе пропускания для телекоммуникационных систем.

Все новые научные результаты, приведенные в диссертационной работе, получены соискателем лично или при его активном непосредственном участии. Результаты и их трактовка с большим интересом обсуждались и были одобрены на Всероссийских и международных конференциях.

Следует отметить, что как научный сотрудник Нерадовский М.М. зарекомендовал себя высококвалифицированным талантливым экспериментатором. Он продемонстрировал увлеченность, высокую эффективность и самостоятельность. Как научный руководитель, я могу охарактеризовать его как вполне сложившегося исследователя.

Считаю, что диссертационная работа, несомненно, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а Нерадовский Максим Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Научный руководитель,  
доктор физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник  
отдела оптоэлектроники и полупроводниковой техники  
научно исследовательского института  
Физики и Прикладной математики Института естественных наук  
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»,  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Шур Владимир Яковлевич

30.03.2016 г.





# LABORATOIRE DE PHYSIQUE DE LA MATIERE CONDENSEE

From : Marc P. De Micheli  
Research Director at CNRS  
Deputy Director of LPMC

The REVIEW  
of the Director on the thesis of  
Maxim Neradovskiy

## CREATION OF OPTICAL WAVEGUIDES WITH PERIODICAL DOMAIN STRUCTURES IN LITHIUM NIOBATE SINGLE CRYSTALS AND THEIR STUDY BY MICROSCOPY METHODS

The PhD thesis of Maxim Neradovskiy is devoted to the creation and the investigation of proton exchange waveguides in periodically poled lithium niobate and writing periodical domain structures in optical waveguides by focused electron beam. These investigations are of great fundamental interest in solid state physics since the polarization reversal process can be considered as an example of first-order phase transition. *In situ* visualization of the evolution of the domain structure gives important additional information about such crystal structure transformation. At the same time, the study of the influence of proton exchange on periodical domain structure and of the formation of domain structure by electron beam irradiation in proton exchanged congruent lithium niobate covered by surface dielectric layer is important for the further development of integrated optical circuits devoted to optical information processing.

Using a set of modern experimental methods for the formation and the observation of ferroelectric domain structures allowed M. Neradovskiy to obtain several very important new results. (1) It has studied the qualitative change induced in the domain structure evolution in CLN by dielectric surface layers produced by PE. The changes are due to the ineffective screening of depolarization field. Such conditions lead to formation of nanodomains in front of the moving domain walls resulting in continuous wall motion. All obtained effects can be attributed to features of the domain kinetics in highly non-



UMR 7336 CNRS – Université Nice Sophia-Antipolis  
Parc Valrose, 06100 Nice Cedex  
Tel. : +33 (0)4 92 07 67 92 Fax. : +33 (0)4 92 07 67 54



equilibrium switching conditions caused by retardation of the bulk screening of the depolarization field. (2) The observation of the appearance of a number of surface nanodomains during the waveguide fabrication has been used to explain the poor nonlinear performance observed in certain channel waveguides produced by soft proton exchange in periodically poled congruent lithium niobate crystals.. (3) A detailed study of the formation of periodic domain structures by e-beam patterning of CLN wafers presenting planar and channel waveguides produced by SPE process has been carried out. The formation of isolated submicron domains has been observed and attributed to the discrete switching caused by ineffective screening of the depolarization field provided by the surface layer modified by SPE process. The developed technique has been used to write high quality periodic domains in channel waveguides, which allowed obtaining a nonlinear conversion efficiency of up to 48%/(W·cm<sup>2</sup>) in SHG experiments.

All the new results presented in the thesis, were obtained by Maxim Neradovskiy personally or with his active participation. The results were published in a number of peer-reviewed scientific journals (5 publications), presented in 20 Russian and international conferences.

It worth noting also that this research work was partially supported by several Russian foundations and a Scholarships of the French Government. Thus, the thesis of Maxim Neradovskiy represents an example of successful international scientific collaboration.

During its research work at LPMC, Maxim Neradovskiy showed himself as a highly skilled specialist in scanning probe microscopy and waveguide optics. As a supervisor of the thesis, I will qualify M. Neradovskiy as a mature research worker. I consider that his work satisfies all the requirements for a PhD thesis and that Maxim Neradovskiy deserves a PhD degree.

Marc P. De Micheli,  
Research Director of CNRS  
Working at University of Nice Sophia Antipolis  
Nice, April the 4<sup>th</sup>, 2016



UMR 7336 CNRS – Université Nice Sophia-Antipolis  
Parc Valrose, 06100 Nice Cedex  
Tel. : +33 (0)4 92 07 67 92 Fax. : +33 (0)4 92 07 67 54



# Лаборатория физики конденсированных материалов

От: Марк П. Де Мишели  
Директор исследований CNRS  
Заместитель Директора LPMC

## ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертацию  
Максима Нерадовского

### Создание и исследование оптических волноводов с регулярной доменной структурой в ниобате лития

Кандидатская диссертация Максима Нерадовского посвящена созданию и исследованию волноводов, изготовленных методом протонного обмена в ниобате лития с регулярной доменной структурой (РДС) и записи периодической доменной структуры в оптических волноводах фокусированным электронным пучком. Эти исследования представляют большой фундаментальный интерес для физики твердого тела, так как процесс переключения поляризации можно рассматривать как пример фазового перехода первого рода. *In situ* визуализация эволюции доменной структуры дает важную дополнительную информацию о превращении кристаллической структуры. В то же время исследования влияния протонного обмена на РДС и формирование доменной структуры путем облучения пучком электронов ниобата лития с диэлектрическим слоем а поверхности с планарными и канальными волноводами, полученными методом протонного обмена имеет важное значение для дальнейшего развития интегрально-оптических схем для оптической обработки информации.

С помощью набора современных экспериментальных методов формирования и визуализации сегнетоэлектрических доменных структур позволило М. Нерадовскому получить несколько очень важных новых результатов. (1) Было изучено качественное изменение эволюции доменной структуры, вызванное диэлектрическим поверхностным слоем, созданным протонным обменом. Изменения вызваны неэффективным экранированием деполяризующего поля. Такие условия вызывают образование нанодоменов перед движущейся доменной стенкой, что приводит к ее непрерывному движению. Все полученные эффекты могут быть отнесены за счет особенностей кинетики доменов при сильно неравновесном переключении, вызванном запаздыванием объемного экранирования деполяризующего поля. (2) Наблюдение возникновения множества поверхностных нанодоменов при создании волноводов было использовано для объяснения плохого нелинейно-оптического преобразования в канальных волноводах, созданных методом мягкого протонного обмена в периодически поляризованном конгруэнтном ниобате лития. (3) Было проведено детальное изучение формирования периодических доменных структур с помощью электронно-лучевой литографии в CLN пластинах с планарными и канальными волноводами, произведенными SPE процессом. Было обнаружено формирование изолированных субмикронных доменов за счет дискретного переключения, вызванного неэффективным экранированием

деполяризирующего поля из-за модификации поверхностного слоя процессом SPE. Разработанная техника была использована для записи высококачественных периодических доменов в канальных волноводах, что позволило получить нелинейную эффективность преобразования до 48%/(Вт см<sup>2</sup>) в ГВГ экспериментах.

Все новые результаты, представленные в диссертации были получены Максимом Нерадовским лично или при его активном участии. Результаты были опубликованы в ряде рецензируемых научных журналах (5 публикаций), представлены на 20 российских и международных конференциях.

Стоит также отметить, что эта исследовательская работа была частично поддержана несколькими российскими фондами и стипендиями правительства Франции. Таким образом, диссертация Максима Нерадовского представляет собой пример успешного международного научного сотрудничества.

Выполняя научную работу в LPMC, Максим Нерадовский показал себя как высококвалифицированный специалист в области сканирующей зондовой микроскопии и волноводной оптики. Как научный руководитель диссертации, я могу охарактеризовать Максима Нерадовского как зрелого научного сотрудника. Я считаю, его работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторской диссертации, и Максим Нерадовский заслуживает присуждения степени PhD.

Марк П. Де Мишели,  
профессор Университета Ниццы Софии Антиполис  
Ницца, 4 апреля 2016

*/подпись/*