

РОССИЙСКО-ИТАЛЬЯНСКИЙ НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР

«МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МИКРО-, НАНО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ»

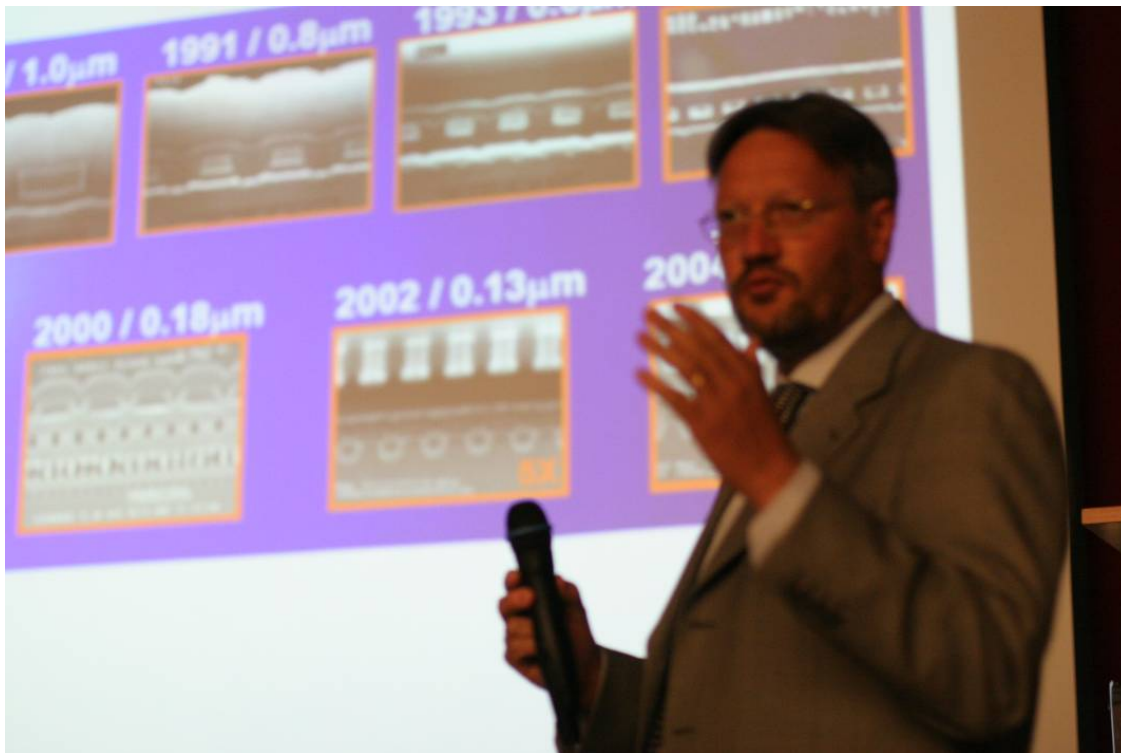
российские партнеры: МИФИ- координатор, МФТИ, НИИЯФ МГУ, ННГУ
(дир-р - проф. В.Н. Неволин, науч. рук. - А.В. Зенкевич)

итальянский партнер: CNR-INFM National Laboratory “Materials and Devices for Microelectronics” (дир-р – проф. М. Фанчулли)

В МИФИ на протяжении последних 7-8 лет сформировалась группа, которая на базе центра коллективного пользования МАЛ («Межкафедральная аналитическая лаборатория», имеющего федеральный статус) стала активно проводить экспериментальные исследования в области роста и исследования тонкопленочных и наноразмерных структур для потенциального применения в микро- и наноэлектронике. Одновременно, велись работы по модернизации имеющегося и закупкам нового оборудования, которое позволяло бы в качестве равноправного партнера участвовать в международных программах по прикладным направлениям физики наноструктур.

Итальянская Национальная лаборатория “Materials and Devices for Microelectronics” (MDM) <http://www.mdm.infm.it> («Материалы и устройства для микроэлектроники») была организована в 1998 г. и нацелена на проведение исследований как фундаментального, так и прикладного характера, имеющих целью поиск и исследование свойств новых перспективных материалов, а также- разработку физических основ новых технологий в микро- и наноэлектронике. Лаборатория располагается на территории R&D центра компании *ST Microelectronics* <http://www.st.com/stonline> (Agrate Brianza, Милан), занимающей *третье* место в мире по объему производства интегральных микросхем, и имеет с ней очень тесные связи. Данная «площадка» этой транснациональной компании занята производством и разработкой микросхем памяти. В настоящее время, помещения Лаборатории INFM-CNR-MDM располагается на площади в 360м² (включая чистую комнату класса 1000 - 94м²), имеет штат в 30 человек, общее кол-во измерительных методик в области тонких пленок ~20, бюджет ~ 2 млн. Евро/год, и хорошо известна среди компаний и научных центров, занятых физическими исследованиями в области тонкопленочных материалов и технологий.

Начиная с 2000 г., используя исторически возникшие научные связи с Директором Лаборатории MDM проф. Марко Фанчулли (Marco Fanciulli), коллектив исследователей в МИФИ завязал сотрудничество, изначально сводившееся к росту и анализу отдельных тонкопленочных образцов, но которое постепенно расширялось по тематике, и на сегодняшний день вылилось в широкомасштабное совместное участие в нескольких научных проектах, часть из которых финансово поддерживаются либо с итальянской, либо с российской стороны. В 2006 г. был выигран Госконтракт Роснауки (№02.438.11.7054, 3 млн. руб.) на организацию **российско-итальянского научно-образовательного центра «Материалы для микро-, нано- и оптоэлектроники»**, который призван объединить и скоординировать усилия ученых двух стран в областях физики, которые имеют отношение к разработке физических основ новых технологий в этих областях промышленности. С российской стороны, НОЦ объединяет научные группы в МФТИ, НИИЯФ МГУ и ННГУ (Н. Новгород), имеющие активное сотрудничество с головным исполнителем в МИФИ по тематикам совместных работ с итальянским партнером.



Лекция Директора Национальной Лаборатории CNR-INFM-MDM проф. М. Фанчулли в МИФИ («Функциональные оксиды для нанoeлектроники, спинтроники и нейрoeлектроники») 15.09.2006.

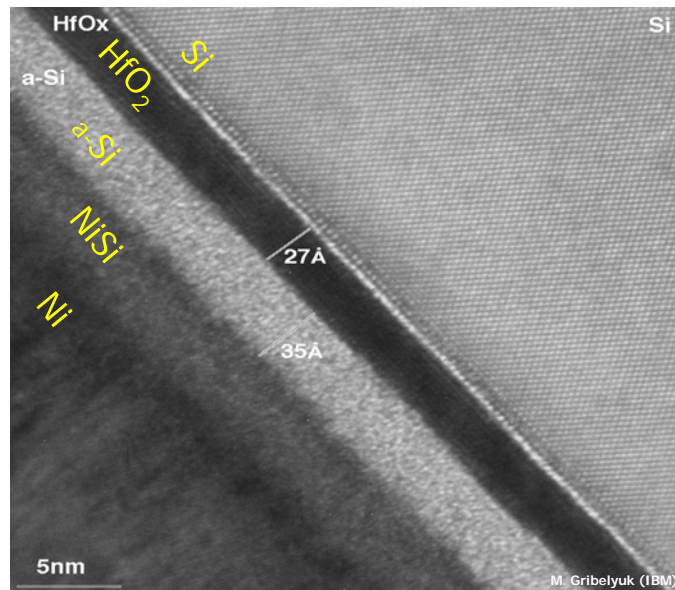
1. Направление исследований и разработок

Индустрия наносистем и материалы: синтез и фундаментальные исследования избранных многослойных наноразмерных структур металл-диэлектрик-полупроводник, металл-диэлектрик-металл, слои захороненных однородных по размеру и глубине залегания нанокластеров металлов в диэлектрической матрице, создание на их основе научного задела технологий изготовления логических и запоминающих приборов нанoeлектроники и спинтроники нового поколения, которые потенциально могут быть использованы в течение 3-8 лет.

2. Научный задел:

- разработаны и отлажены методики роста тонкопленочных диэлектрических слоев методами атомного послойного осаждения и реактивного импульсного лазерного осаждения (ИЛО), а также- методики исследования, прежде всего- *in situ*, сверхтонких слоев оксидов с высоким коэффициентом диэлектрической проницаемости в контакте с кремнием, которые позволяют получать достоверные данные о химическом и фазовом составе сверхтонких слоев диэлектриков, реакциях на границе раздела с кремнием (в частности, исследовано влияние ионного травления при анализе структур HfO_2/Si и ZrO_2/Si), границах стабильности при различных термообработках, электрофизических свойствах; с использованием разработанных методик детально исследованы системы HfO_2/Si , $\text{Lu}_2\text{O}_3/\text{Si}$, $\text{Lu}_x\text{Si}_y\text{O}_z/\text{Si}$, $\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{Si}$, HfO_2/Ge и $\text{Lu}_2\text{O}_3/\text{GaAs}$;
- разработана методика *in situ* исследования формирующейся верхней границы раздела между диэлектриком и материалом электрода затвора с использованием методов реактивного ИЛО и РФЭС/СРМИ для роста и анализа, соответственно, и

впервые были получены данные о кинетике формирования, реакциях на границе раздела для систем Si/HfO₂/Si(100) и Ni-Si/HfO₂/Si(100);



Изображение ПЭМ поперечного сечения выращенной наноразмерной МОП-структуры Ni/NiSi(3 нм)/Si(3.5 нм)/HfO₂(2.7 нм)/SiO₂(0.5 нм)/Si(100).

- предложено использование метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии для измерения эффективной работы выхода металлических слоев в контакте с диэлектриком Ошибка! Закладка не определена., а метода спектроскопии рассеяния медленных ионов- для анализа электронной структуры поверхности сверхтонких диэлектрических слоев;
- получены результаты и предложена модель, описывающая особенности процессов конденсации и роста нанокластеров в сильно неравновесных условиях импульсного лазерного осаждения (совместные исследования каф №10и №25).
- получены детальные экспериментальные данные по границе раздела для различных систем ферромагнитный металл (Fe)/изолятор (изолятор=HfO₂, ZrO₂, Al₂O₃, SiO₂);
- детально исследовано фазообразование в системе Fe-Si, в том числе, в присутствии легирующих примесей.

3. Планируемые исследования

- новые материалы с высоким ϵ на основе сверхтонких (~3-5 нм) слоев оксидов металлов (high- k dielectrics), в частности, HfO₂, ZrO₂, Lu₂O₃, Lu_xAl_{1-x}O₃, La₂O₃, La_xAl_{1-x}O₃, Yb₂O₃, один из которых, начиная с ~2008г., предполагается использовать в качестве подзатворного диэлектрика в технологии изготовления КМОП-приборов (основа процессоров персональных компьютеров, сотовых телефонов и т.п.) всеми ведущими мировыми производителями;
- синтез и исследование проводящих материалов (NiSi_x, NiSiGe, RuO, TiN...) для использования в качестве металлических затворов в КМОП-приборах нового поколения на Si, Ge и GaAs;
- исследование структурных, термодинамических, электрофизических и магнитных свойств избранных наноразмерных структур ферромагнетик-изолятор-ферромагнетик

- и использование их функциональных свойств для разработки физических основ технологии изготовления энергонезависимых элементов памяти нового поколения
- разработка методов формирования систем упорядоченных, однородных по размеру нанокластеров металлов и полупроводников на поверхности и в объеме диэлектрических матриц, исследование их структурных и электронных свойств как основы для создания новых технологий изготовления элементов энергонезависимой памяти (нано-флэш).

Результаты, полученные к настоящему времени, докладывались на более чем 10 международных конференциях в течение последних 2-х лет, и неоднократно публиковались в международных журналах (список публикаций по тематике исследований за последние 2 года см. в Приложении). В целом, совместные исследования ведутся исключительно активно, и, в частности, итальянская сторона рассматривает различные возможности для расширения сотрудничества, в том числе, подачу в 2007 г. заявки с участием российского партнера (МИФИ) в 7-ю Европейскую Рамочную Программу.

Экспериментальные исследования по росту и исследованию структурных и электронных свойств сверхтонких многослойных и наноразмерных структур, проводимые в настоящее время в рамках российско-итальянского НОЦ, ранее вызвали интерес и со стороны других ведущих мировых научных центров в области исследования свойств новых тонкопленочных материалов и структур, в частности, *T.J. Watson IBM Research Center* (США), в сотрудничестве с которым выполнен и опубликован ряд экспериментальных работ (см. приложения 1,2).

4. Используемое оборудование:

- на базе электронного спектрометра XSAM-800 (*Kratos*) создан комплекс (МАЛ МИФИ), который позволяет в одном (сверхвысоко)вакуумном объеме растить сверхтонкие металлические, диэлектрические, полупроводниковые слои, а также формировать структуры металлических нанокластеров на поверхности и в объеме диэлектриков, *методом импульсного лазерного осаждения* (ИЛО) (в том числе, путем осаждения в атмосфере реактивных и инертных газов), и проводить анализ их электронной (химической) структуры методами рентгеновской фотоэлектронной (РФЭС) и Оже-электронной (ОЭС) спектроскопии, а элементный анализ – методами спектроскопии рассеяния медленных ионов (СРМИ) и вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС);



Общий вид исследовательского комплекса ИЛО-РФЭС-СРМИ (МИФИ).

- на базе прибора Omicron MultiProbe S создан исследовательский комплекс (НОЦ «Физика твердотельных наноструктур» ННГУ), включающий рост сверхтонких проводящих слоев методом импульсного лазерного осаждения, и *in situ* анализ их морфологических и электронных свойств методами зондовой микроскопии и спектроскопии в сверхвысоком вакууме в сочетании с анализом химического состава методом РФЭС/ОЭС; для прецизионного измерения профиля распределения по глубине элементов в многослойных структурах, и его эволюции в процессе различных термообработок, а также ориентационных эффектов в эпитаксиальных структурах, предполагается использовать метод спектроскопии рассеяния ионов средних энергий (СРИСЭ), реализованный в исследовательском комплексе на базе сверхвысоковакуумной аналитической камеры TUBA (Нидерланды) и каскадного ускорителя на 150 кэВ, а также- методом обратного резерфордского рассеяния (ОРР), реализованного на ускорителе Ван-Граафа с энергией до $E=2.5$ МэВ (НИИЯФ МГУ);
- комплекс на базе сканирующего электронного микроскопа DSM-960, Opton (МАЛ МИФИ) позволяет анализировать изменения морфологии поверхности методами сканирующей электронной микроскопии в сочетании со сканирующей туннельной микроскопией и локальным анализом элементного состава методом энергодисперсионного анализа (ЭДА) с возбуждением электронным пучком. Кроме того, в распоряжении коллектива исполнителей имеются следующие аналитические методики:
 - просвечивающая электронная микроскопия (200СХ, JEOL- каф.38, МИФИ);
 - зондовая микроскопия (МФТИ);
 - оптическая спектроскопия для анализа электронной структуры диэлектриков (CARY300, Varian- каф.9, МИФИ);
 - комплекс методик для электрофизических измерений (С-V, I-U - ННГУ, МАЛ МИФИ).

Приложение 1. Перечень публикаций исполнителей в МИФИ, по тематике проекта за 2005-2007 гг. (в т.ч. в соавторстве с MDM, МФТИ, МГУ и ННГУ):

1. Yu. Lebedinskii, A. Zenkevich and E. Gusev "Measurements of metal gate effective work function by x-ray photoelectron spectroscopy". Принято к печати в **J. Appl. Phys.** в 2007г.
2. A. Zenkevich, Yu. Lebedinskii, G. Scarel and M. Fanciulli "Film and interface layer composition of rare earth (Lu, Yb) oxides deposited by ALD", В сб. «Rare earth oxide thin films: growth, characterization and applications», Eds. M. Fanciulli, G. Scarel, **Springer 2007**.
3. A. Zenkevich, Yu. Lebedinskii, G. Scarel, M. Fanciulli, A. Baturin and N. Lubovin, Degradation kinetics of ultra-thin HfO₂ layers on Si(100) during vacuum annealing monitored with *in situ* XPS/LEIS and *ex situ* AFM, принято к печати в **Microelectronics Reliability 2007г**.
4. Yu.Yu. Lebedinskii and A.V. Zenkevich, Effective Work function of NiSi/HfO₂ Gate Stacks Measured with X-ray Photoelectron Spectroscopy, принято к печати в **Microelectronics Reliability 2007**.
5. Д.А. Антонов, Д.О. Филатов, А.В.Зенкевич, Ю.Ю.Лебединский. «Исследование электронных свойств нанокластеров Au в SiO₂ методом комбинированной сканирующей туннельной / атомно-силовой микроскопии.» Принято к печати «**Известия Академии наук: Серия физическая**», 2007.
6. А. С. Батурин, А. В. Зенкевич, Ю. Ю. Лебединский, Н. Ю. Любовин, В. Н. Неволин, Е. П. Шешин, "Исследование механизма деградации сверхтонких слоев HfO₂ на кремнии при вакуумном отжиге методами атомно-силовой микроскопии" «**Поверхность**» 2 33 (2007).
7. A. Zenkevich, Yu. Lebedinskii, M. Pushkin, and V. Nevolin, "Surface Electronic Structure of HfO₂ Resolved with Low Energy Ion Spectroscopy", **Appl. Phys. Lett.**, 89 266643 (2006).
8. G. Scarel, C. Wiemer, G. Tallarida, S. Spiga, G. Seguini, E. Bonera, M. Fanciulli, Y. Lebedinskii, A. Zenkevich, G. Pavia, I. L. Fedushkin, G. K. Fukin, and G. A. Domrachev "Atomic layer deposition of Lu silicate films using [(Me₃Si)₂N]₃Lu". **J. of Electrochem. Soc.**, 153 F271 (2006).
9. В.Д. Борман, А.В. Зенкевич, В.Н. Неволин, М.А. Пушкин, В.Н. Тронин, В.И. Троян "Формирование ансамбля нанокластеров при быстром осаждении атомов на поверхность" **ЖЭТФ 130 984 (2006)**. [JETPh 130 850 (2006)].
10. А.В. Зенкевич, Ю.Ю. Лебединский, Н.С. Баранцев, В.Н. Неволин, Дж. Скарел, М. Фанчулли и В.С. Куликаускас, «Исследование РФЭС / СРМИ кинетики деградации тонкопленочных слоев HfO₂ на Si(100) во время вакуумного отжига» «**Микроэлектроника**», 35 №4 248-254 (2006).
11. R. Mantovan, C. Wiemer, A. Zenkevich and M. Fanciulli, "CEMS characterisation of Fe/high-κ oxide interfaces". **Hyperfine Interact.** DOI 10.1007/s10751-006-9449-4 (2006).
12. Yu. Yu. Lebedinskii, A. Zenkevich, E. P. Gusev and M. Gribelyuk "In situ investigation of growth and thermal stability of ultrathin Si layers on the HfO₂/Si (100) high- dielectric system " **Appl. Phys. Lett.** 86, 191904 (2005).
13. H. P. Gunnlaugsson, A. Zenkevich and G. Weyer, Conversion electron Mössbauer spectroscopy on random Fe-Ti alloy films prepared by pulsed laser deposition, **J. Alloys Comp.** 398 33 (2005).
14. S. Spiga, C. Wiemer, G. Scarel, G. Seguini, and M. Fanciulli A. Zenkevich and Yu. Lebedinskii "Physical, chemical and electrical characterization of high-κ dielectrics on Ge and GaAs", Глава в книге «Advanced gate stacks on Ge and GaAs», Ed. A. Dimoulas, **Springer, 2006**.
15. Yu. Lebedinskii, A. Zenkevich, M. Pushkin, V. Troyan and V.Nevolin "Can LEIS spectra contain information on surface electronic structure of high-k dielectrics?" В сб. "Defects in high-k gate dielectric stacks", p.323, Ed. E. Gusev, **Springer, 2006**.
16. Yu. Lebedinskii, A. Zenkevich, E. Gusev "Monitoring of Fermi level Variations at metal/high-k interfaces with in situ x-ray photoelectron spectroscopy", p.339, В сб. "Defects in high-k gate dielectric stacks", p.323, Ed. E. Gusev, **Springer, 2006**.
17. A. Zenkevich, Yu. Lebedinskii, G. Scarel and M. Fanciulli "XPS/LEIS study of high-k rare earth (Lu, Yb) oxides and silicates on Si: the effect of annealing on microstructure evolution" p.147, В сб. "Defects in high-k gate dielectric stacks", p.323, Ed. E. Gusev, **Springer, 2006**.
18. D.A. Antonov, D.O. Filatov, A.V. Kruglov, G.A. Maximov, A. Zenkevich, Yu. Lebedinskii "Investigation of electronic properties of thin dielectric films by scanning probe microscopy" p.471, В сб. "Defects in high-k gate dielectric stacks", p.323, Ed. E. Gusev, **Springer, 2006**.

Приложение 2. Участие коллектива исполнителей МИФИ в международных конференциях по тематике исследований НОЦ (2005-2006 г.):

1. **E-MRS Spring Meeting**, Nice June,2, 2006: G. Scarel, S. Spiga, C. Wiemer, E. Bonera, G. Seguini, X. Li, M. Fanciulli, S. Schamm, I.L. Fedushkin, Yu. Lebedinskii and A. Zenkevich, „Rare earth oxides by atomic layer deposition as gate dielectrics on Si and Ge: evaluation and perspectives”.
2. **14-th Workshop on Dielectrics in Microelectronics** (WoDiM, June 26-28, 2006): Yu. Lebedinskii, A. Zenkevich, G. Scarel, M. Fanciulli, A. Baturin and N. Lubovin, “Degradation kinetics of ultrathin HfO₂ layers on Si(100) during vacuum annealing monitored with in situ XPS/LEIS and ex situ XTEMAFM”; Yu. Lebedinskii and A. Zenkevich “Effective Work function of Ni-Silicide/HfO₂ Gate Stacks Measured with X-ray Photoelectron Spectroscopy”.
3. **7-th International Conference of Solid State Chemistry** (SSC 2006): E. Varesi, G. Pavia, A. Zenkevich, Yu. Lebedinskii, P. Besana, A. Giussani, A. Modelli “Structural and Physical analysis on MOCVD Ti-Si-N films”.
4. **8-я российская научно-техническая конференция «Электроника, микро- и наноэлектроника»**, Гатчина, июнь 2006 г.: Zenkevich A.B., Lebedinskii Ю.Ю., Пушкин М.А., Троян В.И., Баранцев Н.С., Неволин В.Н., Scarel G., Fanciulli M., «Исследование кинетики деградации тонкопленочных слоев HfO₂ на Si(100) при вакуумном отжиге».
5. **35-я Международная конференция по взаимодействию заряженных частиц с кристаллами**, Москва 29 мая-2 июня 2006 г.: А.В. Зенкевич, Ю.Ю. Лебединский, М.А. Пушкин, Н.С. Баранцев, В.С. Куликаускас, «Влияние электронной структуры поверхности соединений Hf на «тонкую» структуру в спектрах рассеяния медленных ионов He⁺»; П.Н.Черных, Ю.Ю.Лебединский, А.В.Зенкевич, В.С.Куликаускас, «Влияние стехиометрии и фазового состава тонкопленочных слоев Ni-Si на их электронные свойства в МДП-структурах Ni-Si/HfO₂/Si».
6. **Всероссийское совещание "Нанофизика и наноэлектроника"** (Н.Новгород, 13-17 марта 2006): Д.А. Антонов, Д.О. Филатов, Г.А. Максимов, А.В.Зенкевич, Ю.Ю.Лебединский «Исследование электрофизических свойств тонких пленок ZrO₂, HfO₂ после отжига в вакууме методами СЗМ и РФЭС»; Д.А.Савельев, Д.А.Антонов, Д.О.Филатов, Е.С.Демидов, С.В.Тихов, Д.М.Дружнов, А.В.Зенкевич, Ю.Ю.Лебединский «Электрофизические свойства пленок Ni_xSi_{1-x} и Hf_xSi_{1-x} на HfO₂/Si и SiO₂/Si.» Д.А.Антонов, Д.О.Филатов, А.В.Зенкевич, Ю.Ю.Лебединский, «Исследование электронных свойств нанокластеров Au в SiO₂ методом комбинированной сканирующей туннельной/атомно-силовой микроскопии»; А.С.Батурин, А.В.Зенкевич, Ю.Ю.Лебединский, Н.Ю. Любовин, Е.П. Шешин, «Исследование механизма деградации сверхтонких слоев HfO₂ на кремнии при вакуумном отжиге методами атомно-силовой микроскопии».
7. **2005 MRS Spring Meeting**, march 28 – april 1 2005, San Francisco, CA, USA. Yu. Lebedinskii, A. Zenkevich, M. Gribelyuk and E. Gusev, In-situ Characterization of Growth, Thermal Stability and Electronic Structure of Poly-Si and FUSI Gate Electrodes on HfO₂ High-k Gate Dielectrics.
8. **ESF PESC Exploratory Workshop «Rare Earth Oxide Thin Films: growth, characterization, and applications»** Sanremo, Italy, 11-13 May 2005, Yu. Lebedinskii, A. Zenkevish, G. Scarel and M. Fanciulli, Film and Interface Layer Composition of rare earth (Lu, Yb) oxides deposited by ALD.
9. **NATO Advanced Research Workshop “Defects in Advanced High-k Dielectrics” DeHiK-2005.**, С.-Петербург, 11-14 июля, 2005: A. Zenkevich, XPS/LEIS study of high-k rare earth (Lu, Yb) oxides and silicates on Si: the effect of annealing on microstructure evolution.
10. **XXXV Международная конференция по взаимодействию заряженных частиц с кристаллами**, Москва, 30 мая- 2 июня, 2005 г.: Ю.Ю. Лебединский, А.В. Зенкевич, Н.С. Баранцев, В.С. Куликаускас, В.Н. Неволин. “Наблюдение «тонкой структуры» в энергетических спектрах медленных (300-800 эВ) ионов He⁺, обратно рассеянных на поверхности Hf-содержащих мишеней”.
11. **V Международная конф. по микро- и наноэлектронике**, Звенигород, 10.2005. А.Зенкевич, «Кинетика деградации сверхтонких слоев HfO₂ на Si(100) при вакуумном отжиге»; A. Zenkevich, Yu.Yu. Lebedinskii, E.P. Gusev, M. Gribelyuk and V.N. Nevolin, Poly-Si and FUSI gate electrodes on HfO₂ high-k gate dielectrics: *in-situ* characterization of growth, thermal stability and electronic structure
12. **Int. Conf. on Atomic Layer Deposition (ALD-2005)**. G. Scarel, C. Wiemer, S. Spiga, E. Bonera, and M. Fanciulli, I. Fedyushkin, Yu. Lebedinskii, A. Zenkevich, Effects of precursor and substrate choice on the properties of thin Lu₂O₃ and Yb₂O₃ films deposited using atomic layer deposition..
13. **Int. Conf. on the Appl. of Mossb. Effect.(ICAME-2005)**. R. Mantovan, M. Fanciulli, C. Wiemer, and A. Zenkevich, CEMS characterization of iron/high-k oxides interfaces,.
14. **ICANS-2005**. A.Teren, E.Varesi, R.Mantovan, E.Bonera, M.Fanciulli, A.Zenkevich, N.Barantsev, Yu.Lebedinskii, “Investigation of Sn-doped Chalcogenide Thin Films”.