

# Отдел **Микроэлектроники** **НИИЯФ МГУ**

---



Низкотемпературная плазма,  
газовые лазеры и плазменные  
микротехнологии (история развития  
направления в НИИЯФ и на  
кафедре атомной физики, физики  
плазмы и микроэлектроники  
физического факультета МГУ)

# Лев Андреевич Арцимович



Профессор МГУ с 1947 г., основатель и **первый заведующий (1954-1973) кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физфака МГУ**, он создал общефакультетский курс „Атомная физика“ В ряду прочего Лев Андреевич оставил как память о себе российскую научную школу физики высокотемпературной плазмы, сохраняющую по сей день мировое признание.



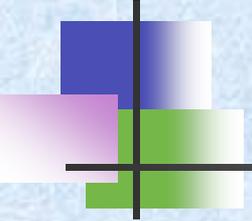
С 1973 по 1988 г.  
кафедрой заведовал  
Е.П. Велихов.

В 1966 г. для  
расширения ведущихся  
на кафедре научных  
работ в НИИ Ядерной  
физики МГУ был создан  
отдел физики плазмы  
(сегодня название этого  
отдела - отдел  
микроэлектроники  
(ОМЭ)).

Фотография 1981 года -  
15-летний юбилей  
лаборатории физики  
плазмы НИИЯФ.



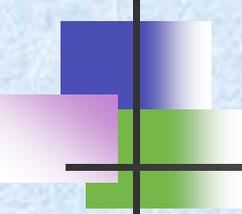
- ⑩ С 1966 по 1978 г. Лабораторией (отделом) физики плазмы руководил
- ⑩ В.Д. Письменный



# Газоразрядные лазеры

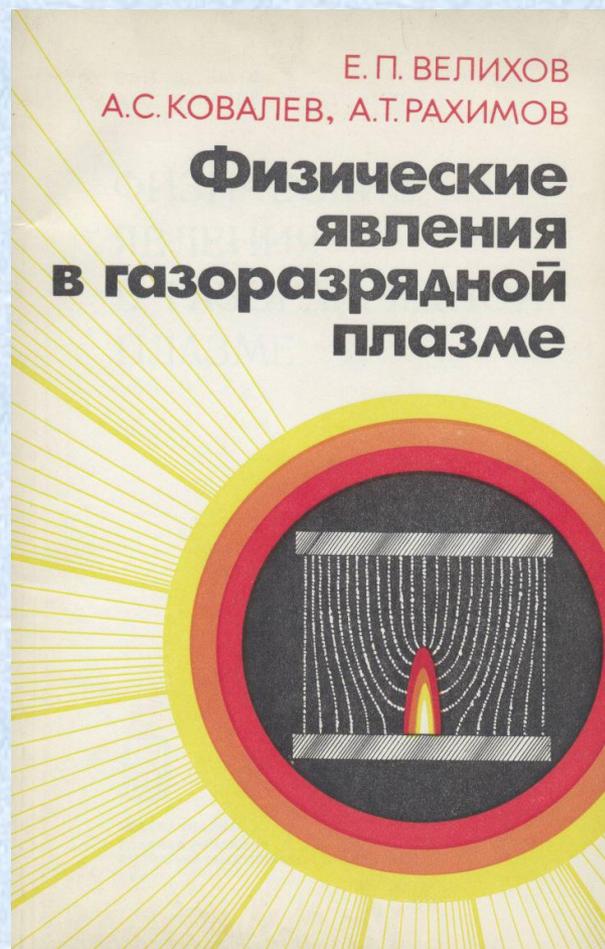
---

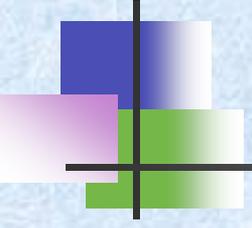
В 1967г. наряду с исследованиями высокотемпературной плазмы в отделе были начаты исследования физики низкотемпературной плазмы, направленные на создание мощных газовых лазеров. Однако первые эксперименты, проведенные в целом ряде лабораторий как у нас в стране, так и за рубежом, показали, что основным процессом, ограничивающим лазерные параметры, является развитие плазменных неустойчивостей, препятствующих возможности однородного и контролируемого возбуждения газовых сред при попытках увеличения их давлений или объемов. Понять природу этих неустойчивостей, найти условия, когда плазменные неустойчивости вообще не будут развиваться или будут существенно подавлены - проблемы, которые исследовались в ОМЭ в течение 10-12 лет до конца 70-х годов. Но самое главное, что понимание физической природы неустойчивостей привело к созданию принципиально нового класса газоразрядных лазеров, возбуждаемых несамостоятельными разрядами.



Изд-во «Наука», Москва, 1987 г.

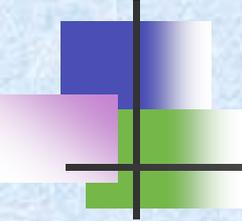
---





---

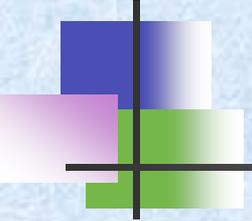
**Процессы взаимодействия  
плазмы  
с материалами, используемыми в  
современной электронике**



# Основные направления исследований

---

- **Исследование ключевых плазменных процессов (как объемных, так и приповерхностных), которые определяют характер взаимодействия плазмы с поверхностью. Исследование процессов травления современных материалов микро и наноэлектроники и осаждения тонких пленок (вплоть до толщины пленок атомарного размера).**
- **Исследование и развитие новых методов возбуждения плазменных источников**
- **Разработка новых приборов, базирующихся на использовании полученных наноструктурированных материалов.**



# Области исследований

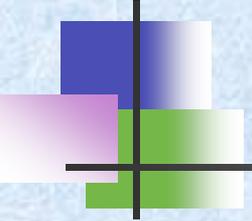
---

## Фундаментальные исследования

1. Плазменная кинетика и плазмохимия
2. Взаимодействие плазмы с поверхностью
3. Диагностика плазмы

## Прикладные исследования

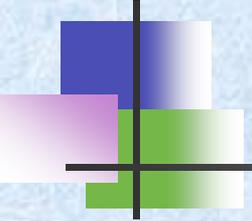
1. Плазмохимическое травление и распыление
2. Модификация поверхности в плазме
3. In situ диагностики для плазменных реакторов



## *Типы плазменных источников, используемые в экспериментальных исследованиях*

---

- DC разряды
- DBD/DC комбинированные разряды
- RF CCP разряды
- (DF) CCP разряды
- ICP RF разряды
- MW разряды
- Разряды на убегающих электронах
- Геликонные разряды
  
- Комбинированные ВЧ + несамостоятельные разряды



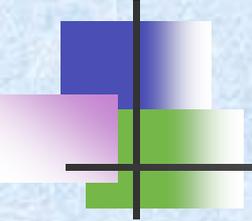
# Диагностические методы

---

1. Зондовая диагностика для измерения EEDFi динамики изменения концентрации электронов и ионов.
2. Анализатор энергии ионов для измерения IEDF и динамики потока ионов на поверхность.
3. Эмиссионная спектроскопия с пространственным и временным разрешением (ES) для измерения различных возбужденных частиц (ионов и нейтральных) методом плазменно-индуцированной эмиссии.
4. Актинометрия для измерения динамики и вероятностей поверхностных потерь H, O.
5. Метод лазерного фотоотлипания в сочетании с зондовой техникой для измерения динамики отрицательных ионов.
6. Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS)
7. Laser-Induced Fluorescence (LIF)
8. UV, VUV absorption spectroscopy для измерений с пространственным и временным разрешением активных нейтральных радикалов и отрицательных ионов.

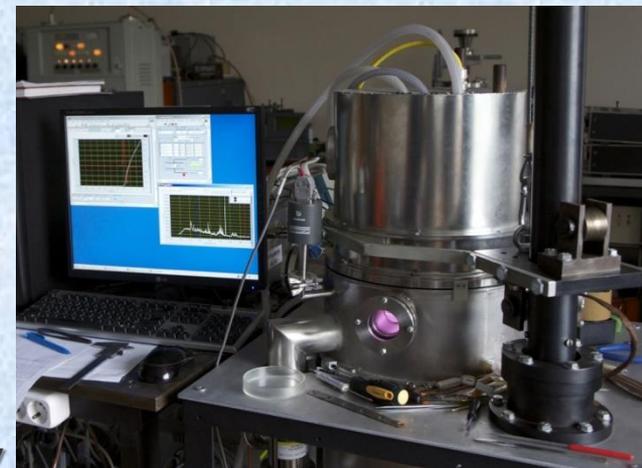
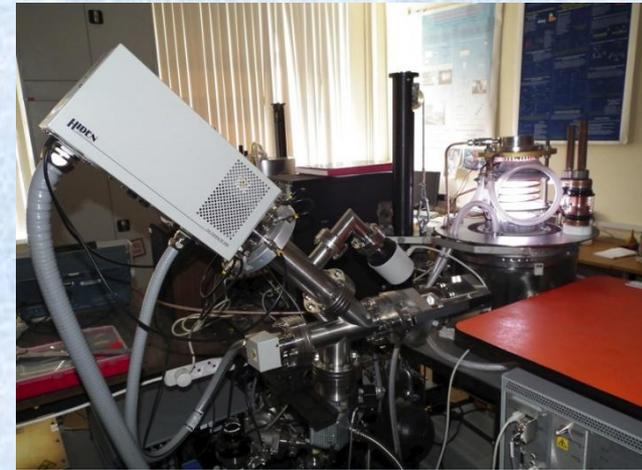
## Диагностика поверхностных структур

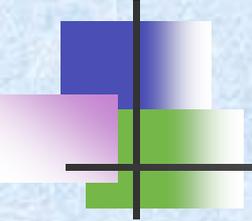
1. X-ray spectroscopy
2. Raman spectroscopy
3. SEM
4. STM
5. FTIR



## Экспериментальные возможности: диагностика

- измерения постоянных и ВЧ токов, напряжений и вложенной мощности
- измерение плотности плазмы (Hairpin зонд)
- измерение функции распределения электронов по энергиям (ВЧ-компенсированный зонд Ленгмюра)
- измерение энергетического спектра ионов (RFEA)
- измерение потока ионов (зонды и модуляция ВЧ-смещения)
- масс-спектрометрия
- спектроскопия (эмиссионная, абсорбционная, лазерная, актинометрия)
- in situ эллипсометрия
- ex situ диагностики образцов (SEM, EDS, XPS, SIMS, FTIR, SE ...)

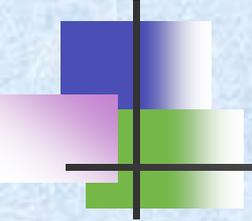




## Разработка симуляционных моделей

---

- 1D fluid model of RF CCP discharge (low and middle gas pressures)
- 1D PIC model of RF CCP discharge (single frequency and dual-frequency)
- 1D hybrid PIC-fluid model of RF CCP discharge
- 1D hybrid model of AC discharge in plasma display panel cell
- 3D model of multi-filament CVD reactor
- 3D model of DC arc-jet CVD reactor
- 2D fluid model of DC positive column
- Monte-Carlo and Two-Term Approximation (TTA) Solvers of kinetic Boltzmann equation
- Extensive plasma-chemistry database and sets of electron cross sections for various gases



# Моделирование плазмохимических процессов в CHF<sub>3</sub> и CHF<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>:O<sub>2</sub> газовых смесях

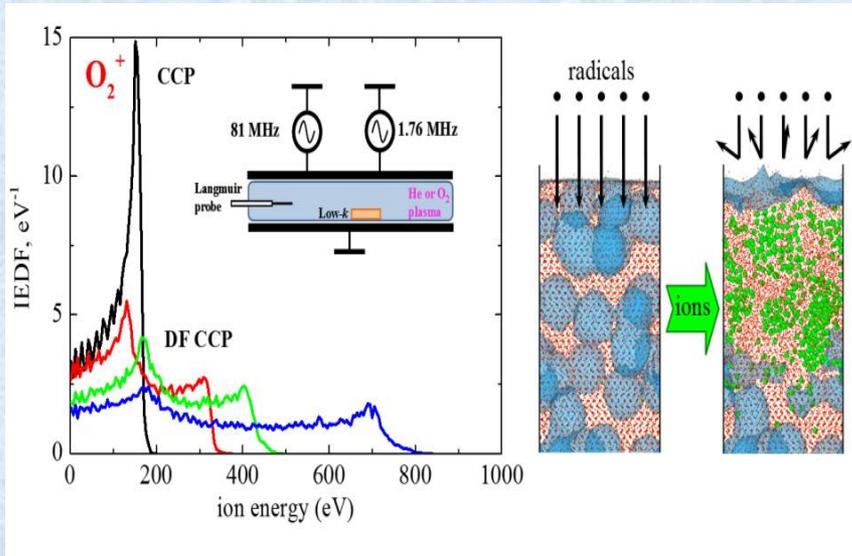
IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 35, NO. 6, DECEMBER 2007

---

- ⑩ Получен самосогласованный набор сечений элементарных процессов для CHF<sub>3</sub>. Найдены суммарные и парциальные сечения диссоциации электронами. Впервые показана важная роль цепных реакций в кинетике атомов F, H и радикалов CF<sub>x</sub>

## МЕХАНИЗМ ЗАПЕЧАТЫВАНИЯ ПОР В OSG LOW-K ПЛЕНКАХ ПОД ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКОЙ

Исследование проведено в рамках международной кооперации МГУ-IMEC, Бельгия



*Plasma Process Polym.*

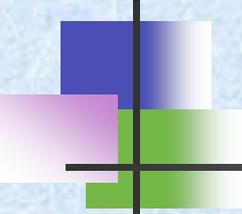
2020;17:e1900165

<https://doi.org/10.1002/ppap.201900165>

165

Нанопористые пленки органосиликатного стекла (OSG) с низкой диэлектрической константой  $k$  используются в качестве межслойных диэлектрических слоев в технологии СБИС. Плазменная обработка этих материалов может приводить к их деградации, увеличивая значение  $k$ , а также уменьшая их время жизни и надежность. Однако, для некоторых OSG пленок под плазменной обработкой возможна денсификация верхнего слоя с запечатыванием пор, что предотвращает деградацию пленок под воздействием активных радикалов из плазмы.

В работе представлены результаты экспериментального и теоретического исследования механизма запечатывания поверхности low- $k$  OSG пленок под воздействием ионной бомбардировки из плазмы. Исследован данный механизм в зависимости от размера пор, типа и энергии ионов. Было установлено, что денсификация верхнего слоя с запечатыванием пор происходит вследствие коллапса, а не разрушения, поверхностных пор (значительной перестройки поверхности) под действием ионной бомбардировки. Полученные результаты представляют большой интерес в плазменной технологии создания проводников в многослойных СБИС технологического уровня  $< 20\text{-}30$  нм.



# Автоматизированные диагностические сенсоры

---

Разработан ряд автоматизированных систем и сенсоров для диагностики низкотемпературной плазмы, в частности плазмы используемой в современных высокочастотных плазмохимических реакторах травления и осаждения

Это системы измерения плотностей и энергетических спектров электронов и ионов. В том числе потока и спектров ионов, приходящих на обрабатываемую поверхность независимо от типа материала. Это зондовые системы на основе вч компенсированных зондов Ленгмюра и активных свч зондов. Вч компенсированный анализатор спектра ионов на любом (вч нагруженном электроде). **Все системы полностью автоматизированы и доведены до уровня автономных цифровых приборов.**

На их основе и быстрых компьютерных моделей также построены виртуальные системы "real-time" анализа плазмы, потока и спектра ионов на обрабатываемую в плазме поверхность, использующие внешние характеристики установки и параметры разряда.

**В совокупности подобный подход позволяет разработать и создать системы прецизионного контроля плазмы и обработки материалов в плазменной технологии, особенно в микроэлектронике. С их помощью могут быть созданы точные алгоритмы управления плазмохимическими процессами, учитывающие происходящие "real-time" изменения в процессе, реакторе и т.п.** Это обеспечит высокую воспроизводимость и качество процесса. Особенно это важно с переходом на нм, фактически атомарный уровень обработки, например в процессах плазменного атомно слоевого травления (ALE) или осаждения (ALD).



- ⑩ **FOCUSED REVIEW: Plasma processing of low-k dielectrics**
- ⑩ Mikhail R. Baklanov<sup>1</sup>, Jean-Francois de Marneffe<sup>1</sup>, Denis Shamiryan<sup>2</sup>, Adam M. Urbanowicz<sup>2</sup>, Hualiang Shi<sup>3</sup>, Tatyana V. Rakhimova<sup>4</sup>, Huai Huang<sup>5</sup>, and Paul S. Ho<sup>5</sup>

⑩ <sup>1</sup>*IMEC, Leuven, Belgium*

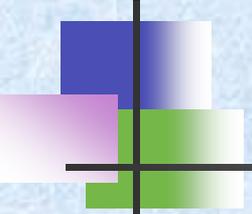
⑩ <sup>2</sup>*GLOBALFOUNDRIES, Dresden, Germany*

⑩ <sup>3</sup>*INTEL Corporation, Chandler, Arizona 85226, USA*

⑩ <sup>4</sup>*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia*

⑩ <sup>5</sup>*University of Texas at Austin, Texas 78758, USA*

⑩ (Received 12 March 2012; accepted 16 October 2012; published online 22 January 2013 Volume 113, Number 4)



# Applied Physics Reviews

Five-Year  
Impact Factor

15.421

---

***Focused Review: Impact of VUV Photons on SiO<sub>2</sub> and Organosilicate Low-k Dielectrics: General Behavior, Practical Applications and Atomic Models (v.6, 011301 (2019); doi: 10.1063/1.5054304).***

***M. R. Baklanov<sup>1,2</sup>, V. Jousseau<sup>3,4</sup>, T. Rakhimova<sup>5</sup>, D. Lopaev<sup>5</sup>, Yu. Mankelevich<sup>5</sup>, V. V. Afanas'ev<sup>6</sup>, L. Shohet<sup>7</sup>, S. W. King<sup>8</sup>, and E. T. Ryan<sup>9</sup>***

*<sup>1</sup> North China University of Technology, 100144 Beijing, China*

*<sup>3</sup> Université Grenoble Alpes, F-38000 Grenoble, France*

*<sup>4</sup> CEA, LETI, MINATEC Campus, F-38054 Grenoble, France*

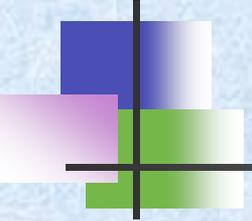
*<sup>5</sup> Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russia.*

*<sup>6</sup> Department of Physics and Astronomy, University of Leuven, B-3001 Leuven, Belgium.*

*<sup>7</sup> Plasma Processing and Technology Laboratory and Department of Electrical and Computer Engineering, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI 53706, USA*

*<sup>8</sup> Logic Technology Development, Intel Corporation, Hillsboro, Oregon 97124, USA*

*<sup>9</sup> GLOBALFOUNDRIES, Albany, NY 12203, USA*



# Направление исследований

---

- ⑩ Исследование физики прецизионных плазменных процессов и фундаментальных явлений взаимодействия излучения, заряженных и активных нейтральных частиц плазмы с двумерными и наноструктурными системами.
- ⑩ Целью этих исследований является разработка таких способов возбуждения плазмы, которые дадут возможность прецизионно управлять плазменными параметрами, что позволит контролировать с атомными масштабами точности структурную и химическую модификацию поверхности заряженными и активными нейтральными частицами плазмы.
- ⑩ Эти исследования направлены на разработку перспективных технологий наноэлектроники с атомными масштабами точности.

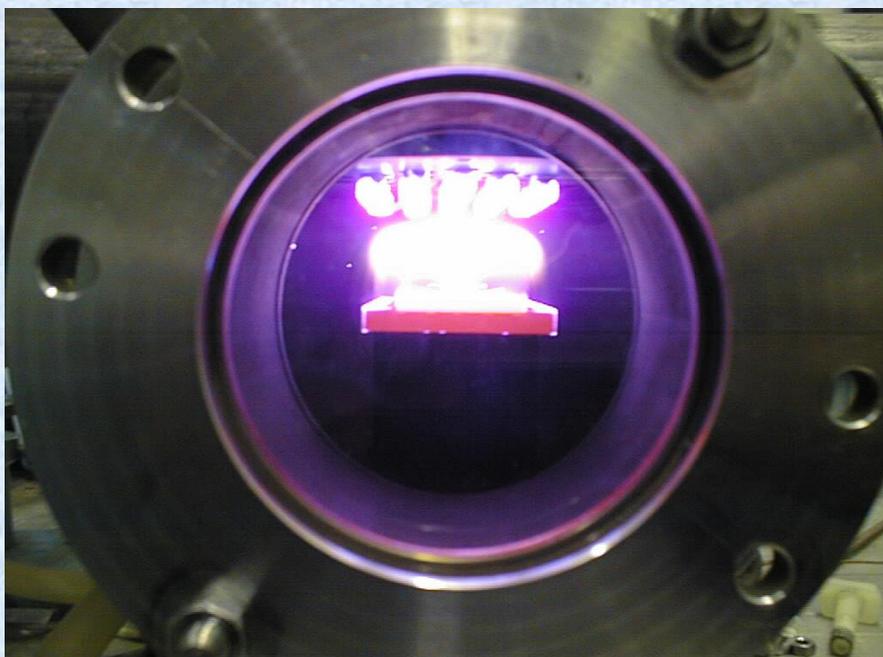
# CVD reactor based on a DC discharge

## Основные свойства

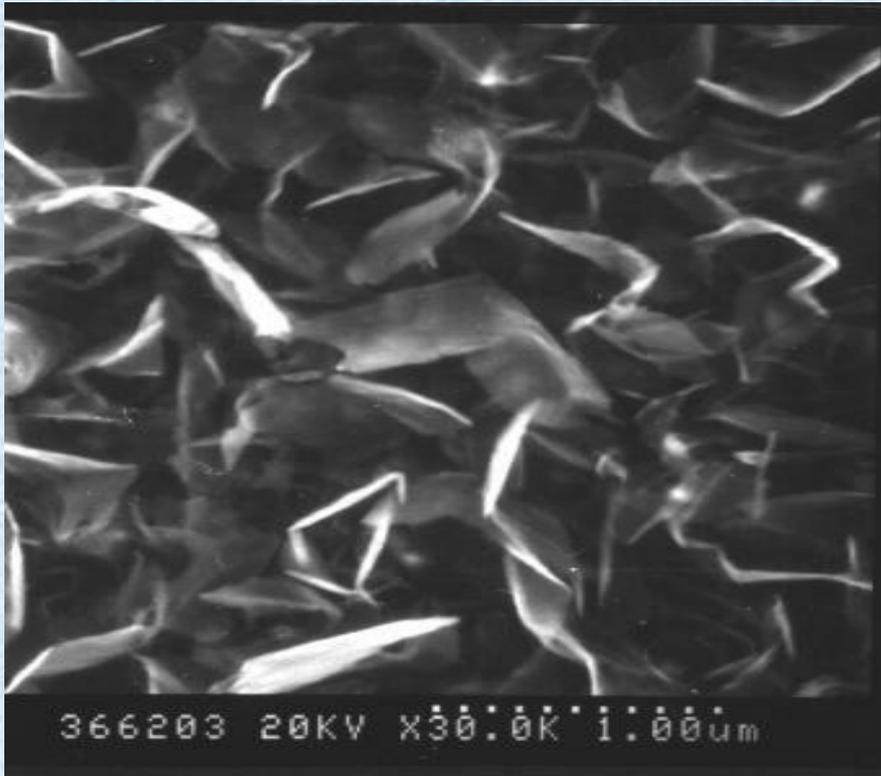
- Возможность масштабирования
- Возможность варьировать энергию ионов, задавая потенциал подложки
- Высокая скорость осаждения

## Основные применения

- Рост алмазных пленок
- Рост нанокристаллических углеродных пленок



# Нанокристаллические (НКГ) углеродные пленки.

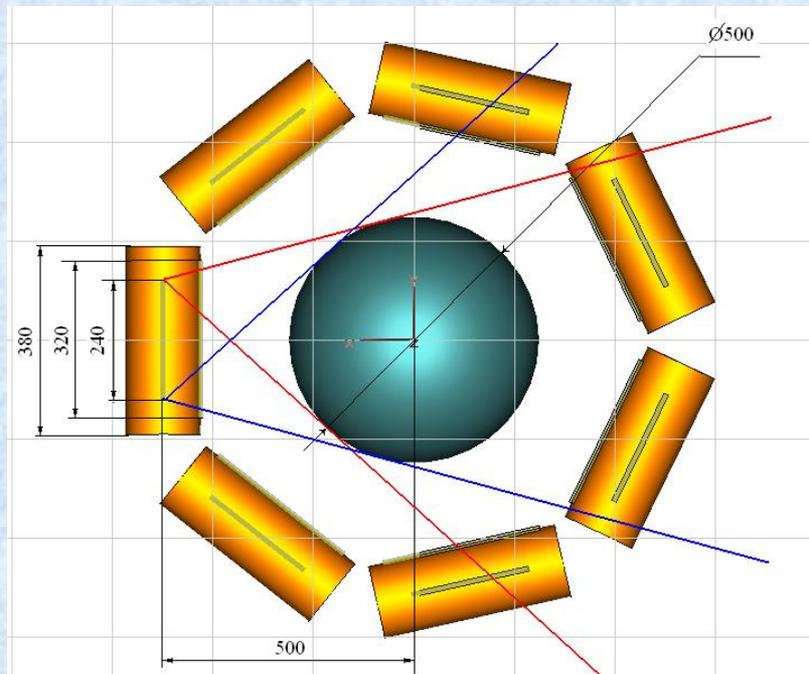


Материал ребристой структуры с плотностью в несколько ребер на один  $\mu\text{м}^2$ . Типичная толщина ребер – порядка нм, а их длина – порядка микрона. Несмотря на кажущуюся хрупкость, материал очень прочен. Уникальная структура данных тонких пленок придает им исключительные по своим параметрам эмиссионные характеристики

**X-ray tube with 40 cold cathode sources  
for CT with electron scanning**

---



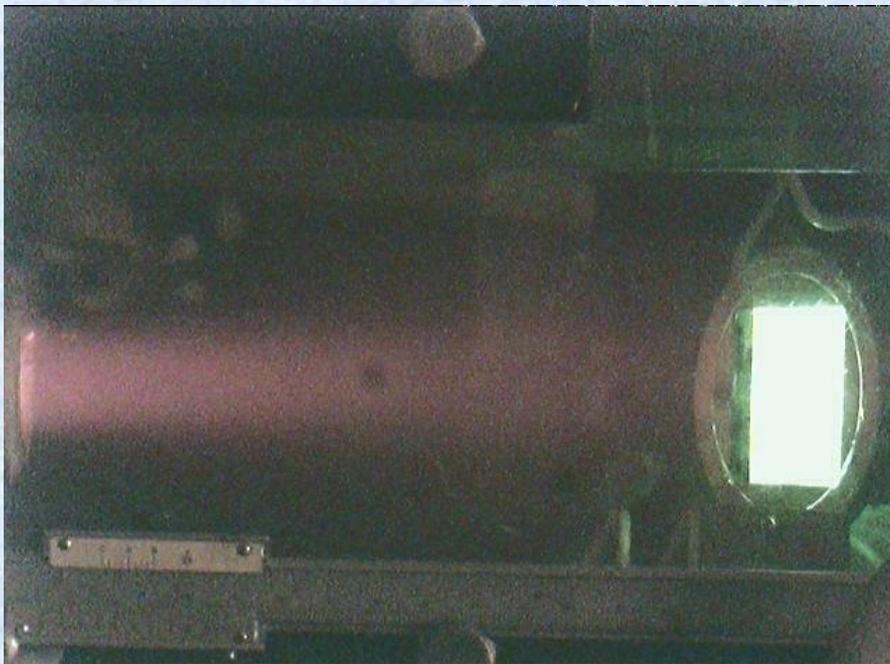


- ⑩ Schematic picture: X - ray tomograph (CT) with electron scanning of x-ray spot

# *Department of microelectronics SINP MSU*

## DC discharge with run-away electrons

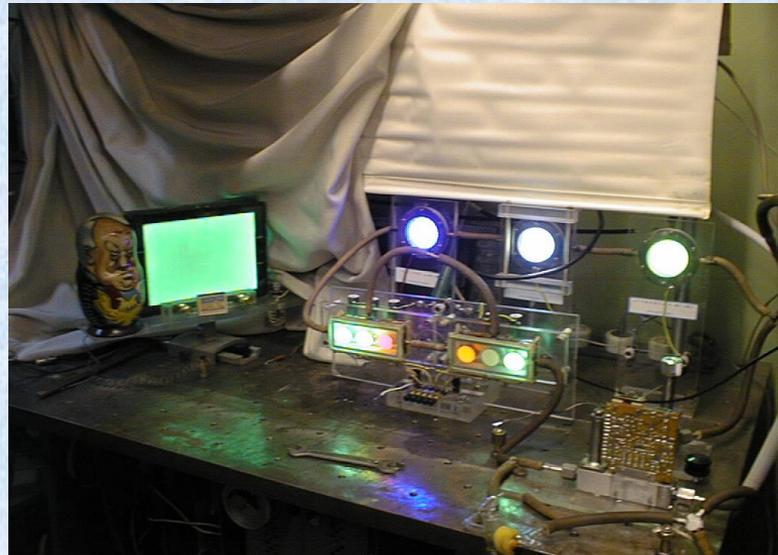
---



The excitation of the green phosphor (on the right) by the runaway electron gun (on the left)

The application research – development of bright effective emitting screens on the basis of phosphor excitation by runaway electrons (brightness  $> 20000$  cd/m<sup>2</sup>, efficiency  $> 30$  lm/W).

# Высокояркие источники света



Эффективность  $\eta = 20 \div 30 \text{ Lm/W}$   
Яркость  $B = 10000 \div 30000 \text{ Cd/m}^2$   
Рабочее напряжение  $U = 4 \div 6 \text{ kV}$

# Сборка Плазменного Экрана



# Плазменные экраны

**Из рекламы крупнейшей международной выставки CeBIT 2002: плазменные панели от отечественного производителя!**

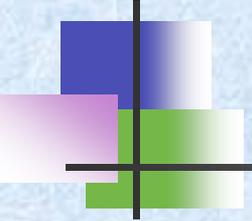
На выставке CeBIT (Ганновер) 2002 демонстрируется не только продукция зарубежных производителей. Одна из отечественных компаний

Инкотекс, наряду со своими контрольно-кассовыми машинами, принтерами, промышленным и другим оборудованием, представила на выставке ряд цветных наборных плазменных экранов коллективного пользования с большой диагональю и качеством телевизионного или компьютерного изображений (разработка НИИ ядерной физики МГУ им. М.В.Ломоносова).



# Персональный компьютер «Корвет»





# Персональный компьютер «Корвет»

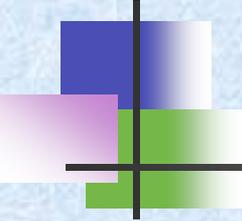
*Источник: Википедия*

«Корвет» – советский 8-разрядный [персональный компьютер](#).

Разработан в 1985 году сотрудниками [Института ядерной физики Московского государственного университета](#). Выпускался серийно с [1987 года](#) на заводах [Министерства Радиопромышленности СССР](#): на Бакинском производственном объединении «Радиостроение», на Брестском ПО СВТ, в Московском ЭЛЕКС ГКВТИ, на [Каменск-Уральском ПО «Октябрь»](#) (в том числе под названием «Нейва»); Фрунзенском заводе «ЭВМ» : Ленинградским ЛНПО «Электроавтоматика».

Изначально компьютер предназначался для автоматизации управления установкой по дистанционному измерению параметров низкотемпературной плазмы методами лазерной спектроскопии, а также для обработки получаемой информации и теоретических расчетов, ведения архива данных и ряда других нужд.

В СССР «Корвет» считался одним из наиболее универсальных, быстрых и совершенных 8-разрядных ПК, с выдающейся скоростью отображения графики<sup>1</sup>. В статьях неоднократно упоминаются данные о том, что скорость закраски областей экрана (или прямоугольников) заданным цветом у «Корвета» превышает 3 млн точек в секунду, и по этому показателю он превосходит ПК IBM PC. Удачная разработка ученых МГУ была поддержана на самом высоком уровне.

- 
- 
- ⑩ **Константин Константинович Лихарев** окончил физфак МГУ в 1966 году по кафедре физики колебаний. После окончания аспирантуры и защиты кандидатской диссертации в 1969 году был оставлен для работы на факультете, где и проработал в различных научных должностях вплоть до перехода в НИИЯФ МГУ в 1987 году. В 1979 году защитил докторскую диссертацию.
  - ⑩ С конца 1960х годов К.К.Лихарев организовал работы по новому, сформулированному им, научно-техническому направлению - сверхпроводниковой электронике, а с середины 1980х годов - также и по одноэлектронике. Для построения принципиально новой цифровой сверхпроводниковой электроники им была предложена концепция динамической быстрой одноквантовой логики, получившая затем всемирное признание. Работы в этом направлении велись под руководством К.К.Лихарева научной группой, состоящей в основном из его учеников и составляющей совместный коллектив, работающий в составе отдела микроэлектроники НИИЯФ и кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники. Для усиления экспериментальных работ в этом направлении при кафедре по инициативе Е.П. Велихова была создана самостоятельная Лаборатория Криоэлектроники, которую К.К. Лихарев возглавлял вплоть до переезда в США в 1991 году.

- ⑩ Декан физического факультета,
  - ⑩ Профессор Н.Н.Сысоев
  - ⑩ Зав. кафедрой АФФП и М,
  - ⑩ Профессор А.Т.Рахимов

2 декабря 2019 года

СТУДЕНТАМ И СОТРУДНИКАМ ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ

Дорогие коллеги,

Мне очень приятно передать в дар родному факультету комплект учебников и задачников моей серии *Essential Advanced Physics*, только что изданных британским Институтом Физики.

Эта серия из 4 курсов, рассчитанных в сумме на 6 семестров, основана на лекциях, которые я читал в Университете Стони-Брук с 1991 по 2013 гг. По своему уровню эти курсы примерно соответствуют циклу теорфизики физфака МГУ.

Конечно, по любому из этих курсов на русском языке есть несколько прекрасных учебников и задачников, по качеству превосходящих мои скромные труды. Однако в моих книгах много перекрёстных ссылок между курсами и новых задач с решениями, а также описано несколько оригинальных подходов к отдельным темам, так что я надеюсь, что они могут быть полезны для студентов-старшекурсников и аспирантов МГУ, несмотря на английский язык.

Заметьте, что предварительная версия лекций этой серии, под общим названием *Essential Graduate Physics*, открыта для бесплатного доступа по любому из следующих сетевых адресов:

<https://commons.library.stonybrook.edu/egp/>

<https://sites.google.com/site/likharev/>

Я планирую со временем сделать эту сетевую версию более полной и «чистой», чем то бумажное издание, которое вы видите (и в котором замеченные опечатки исправлены вручную). В связи с этими планами я был бы очень признателен за любые замечания и предложения, которые лучше присылать по электронной почте – см. адрес в шапке.

С наилучшими пожеланиями, Ваш

К. К. Лихарев  
John S. Toll Distinguished Professor of Physics