

Разработка кремниевых лавинных детекторов с повышенной радиационной стойкостью

З. Я. Садыгов

E-mail: zsadygov@gmail.com , sadygov@jinr.ru

Целью доклада является обсуждение необходимости и возможности разработки новых кремниевых фотоумножителей и стриповых детекторов с повышенной радиационной стойкостью в рамках проекта VM@N NICA

НАЗВАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМЫХ ПРИКЛАДНЫХ И ИННОВАЦИОННЫХ РАБОТ

РАЗРАБОТКА КРЕМНИЕВЫХ ЛАВИННЫХ ДЕТЕКТОРОВ С ПОВЫШЕННОЙ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТЬЮ

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ РАБОТ

“ЛФД-ДЕТЕКТОР”

НАЗВАНИЕ ПРОЕКТА В РАМКАХ КОТОРЫХ БУДУТ ПРОВОДИТЬСЯ ПРЕЛАГАЕМЫЕ РАБОТЫ

ПРОЕКТ “ВМ@N” ТЕМЫ “КОМПЛЕКС NICA” (ШИФР: 02-0-1065)

СПИСОК АВТОРОВ В АЛФАВИТНОМ ПОРЯДКЕ С УКАЗАНИЕМ ИНСТИТУТОВ

Акберов Р. А. (ЛФВЭ), Анфимов Н. В. (ЛЯП), Ахмедов Ф. И. (+2 чел., ИРП, г. Баку, Азербайджан), Ахмедов Г. С. (ЛНФ), Бериков Д. (ЛНФ), Бокова Т. Ю. (ЛФВЭ), Ермолицкий Ф.А. (НИИ ПФП, БГУ, г. Минск, Беларусь), Жежер В. Н. (ЛФВЭ), Замятин Н. И. (ЛФВЭ), Кенесарин М. (ИЯФ, г. Алма-Ата, Казахстан), Копач Ю.Н. (ЛНФ), Копылов Ю.А. (ЛФВЭ), Кучинский П.В. (НИИ ПФП, БГУ, г. Минск, Беларусь), Макаренко Л.Ф. (БГУ, г. Минск, Беларусь), Мухаметулы Б. (ИЯФ, г. Алма-Ата, Казахстан), Назаров К. (ИЯФ, г. Алма-Ата, Казахстан), Нуруев С. М. (ЛНФ), Ращенья Н.А. (+2 чел., НИИ ПФП, БГУ, г. Минск, Беларусь), Рыбников А. В. (ЛЯП), Садыгов А. З. (+2 чел., НЦЯИ, г. Баку, Азербайджан), Садыгов З. Я. (ЛФВЭ), Селюнин А. С. (ЛЯП), Стрелецкая Е.А. (ЛФВЭ), Тарасов О.Г. (ЛФВЭ), Топко Б.Л. (ЛФВЭ), Тютюнников С.И. (ЛФВЭ), Чалышев В. В. (ЛЯП), Чириков-Зорин И. Е. (ЛЯП), Чубраков И. (ИЯФ, г. Алма-Ата, Казахстан), Шереметьева А.И. (ЛФВЭ).

РУКОВОДИТЕЛЬ РАЗРАБОТКИ: САДЫГОВ З. Я.,

ЗАМЕСТИТЕЛЬ: ЗАМЯТИН Н.И.

Содержание доклада

- Актуальность поставленных задач
- Современное состояние проблемы
- Новизна предложенных методов
- Краткое описание разработки
- Оценка кадровых ресурсов

Актуальность поставленных задач

Необходимость улучшения радиационной стойкости кремниевых фотоумножителей и стриповых детекторов вызвана возможностью их широкого применения в проекте «Барионная материя на Нуклотроне» (BM@N NICA), а также в дозиметрах, работающих в условиях высокой радиации. Поэтому повышение радиационной стойкости современных кремниевых детекторов является одной из важных актуальных прикладных задач.

Ввиду того, что процесс образования радиационных дефектов является фундаментальным явлением, то для повышения радиационной стойкости полупроводниковых детекторов следует искать новые конструктивно-технологические методы, с помощью которых можно значительно ослабить влияние радиации на рабочие параметры детектора.

Современное состояние проблемы (Кремниевые фотоумножители)

В настоящее время известны пять типов кремниевых микропиксельных лавинных фотодиодов (МЛФД), называемых также “SiPM” или “MPPC”. Первый и наиболее известный SiPM с поверхностными пикселями и пленочными резисторами был предложен нами в 1996 году [З. Я. Садыгов. Патент России № 2102820. Приоритет от 10.10.1996 г. http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2102820&TypeFile=html]. SiPM содержит кремниевую подложку, на поверхности которой сформирована матрица из отдельных p-n – переходов (пикселей). Все пиксели присоединены к общей металлической шине с помощью индивидуальных пленочных микро-резисторов.

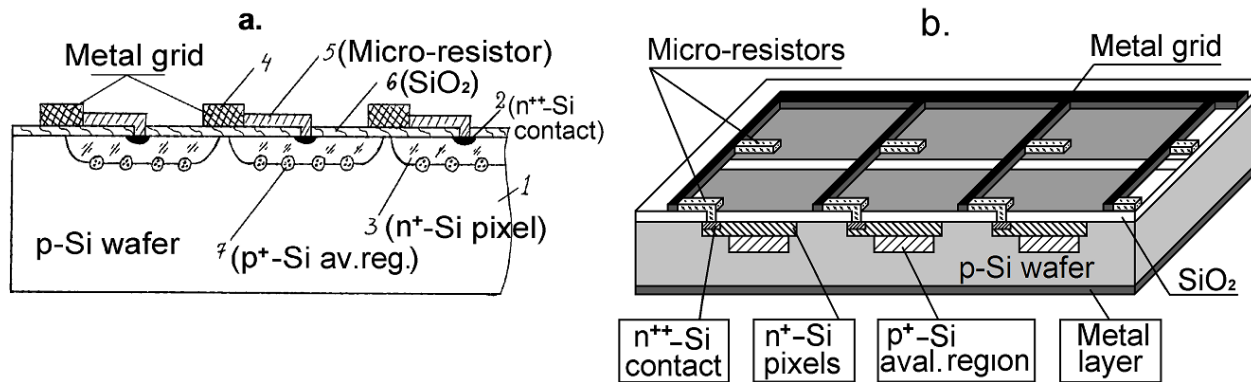


Рис.1. Базовая (а) и действующая (б) конструкция первой версии SiPM.

Современное состояние проблемы

(Стриповые и падовые детекторы)

Одним из методов повышения радиационной стойкости полупроводникового детектора является использование лавинного диода с низким коэффициентом усиления (по-английски, Low Gain Avalanche Diode – LGAD), имеющим значительно меньшую толщину чувствительного слоя по сравнению с традиционными нелавинными детекторами (см. G. Pellegrini et al.. NIM, A765 (2014) 12-16), <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2014.06.008>).

Однако в известных в настоящее время LGAD приборах используют конструкции традиционных лавинных фотодиодов, имеющие плоскопараллельную p-n структуру.

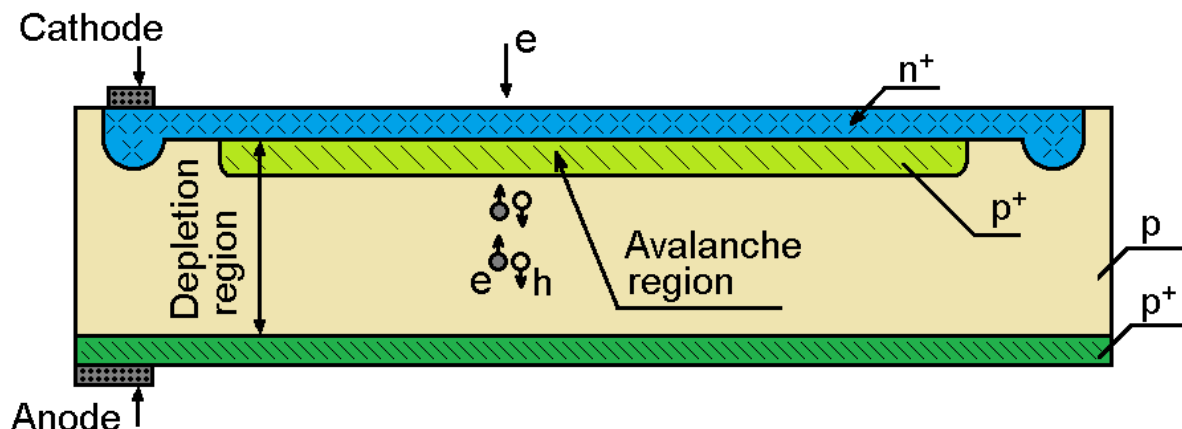


Рис.2. Известная (зарубежная) конструкция LGAD диода

Современное состояние проблемы

Наши исследования показывают, что на основе плоскопараллельной р-n структуры достаточно трудно получить лавинный фотодиод (ЛФД) с однородным коэффициентом усиления сигнала по всей чувствительной площади. Это связано со значительным разбросом напряжения пробоя вдоль плоскости р-n перехода, из-за локальных неоднородностей в объеме кремниевых пластин. Коэффициент усиления такого лавинного фотодиода площадью $S = S_1 + S_2$ может ограничиваться даже единственной неоднородностью площадью $S_2 \ll S_1$, где напряжение пробоя незначительно (меньше 1%) снижено по отношению к остальной поверхности прибора.

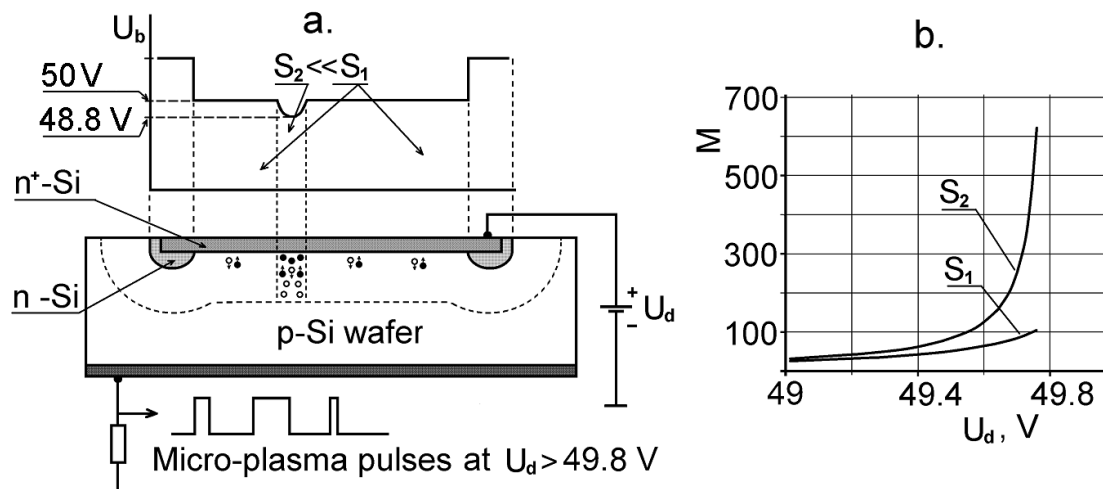


Рис.3. Микроплазменный пробой в ЛФД.

Новизна предложенных методов

Конструкция и технология изготовления новых радиационно-стойких кремниевых детекторов основываются на научно-технологических результатах, полученных авторами при разработке прототипов современных кремниевых фотоумножителей. Нами было установлено, что использование сферических р-п переходов вместо плоскопараллельных р-п переходов приводит к значительному уменьшению разброса напряжения пробоя на поверхности ЛФД.

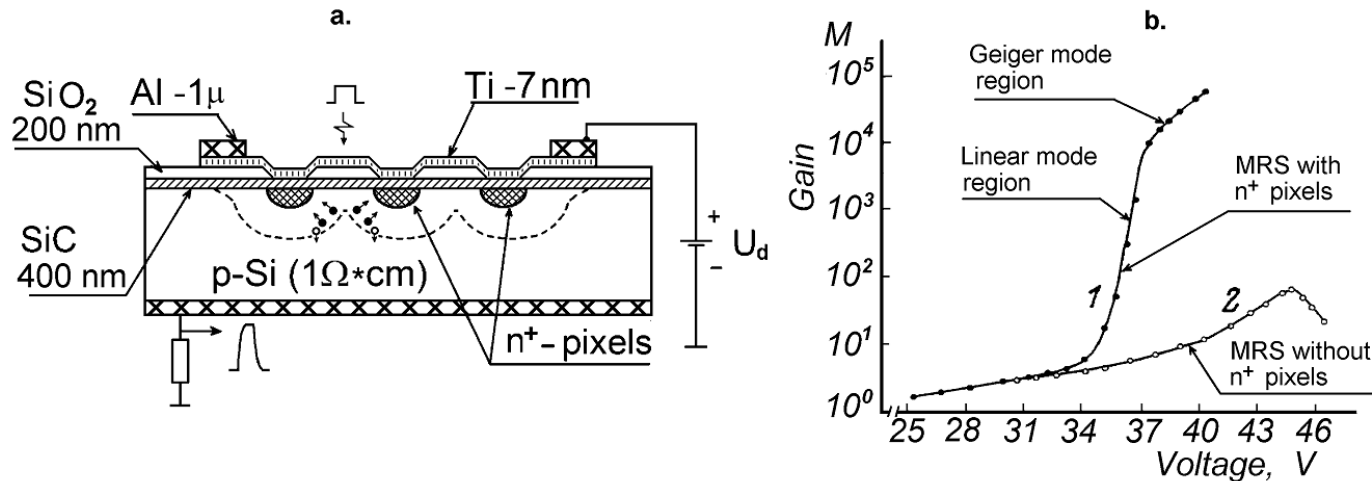


Рис.4. Лавинный МРП (MRS) диод [А. Г. Гасанов В. М. Головин, З. Я. Садыгов, Н. Ю. Юсипов. - Письма в ЖТФ, 1990, т.16, в.1, с.14-17. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/25162>].

Краткое описание разработки (Лавинный стриповый детектор)

Новые стриповые и падовые детекторы будут изготовлены на основе низкоомного кремния, в которых толщина чувствительной области будет уменьшена до 30-и раз по сравнению с известными аналогами. При этом уменьшение количества первичного заряда, созданного ионизирующей частицей в новых стриповых и падовых детекторах, будет компенсировано лавинным усилением носителей заряда в обедненной области полупроводника. В отличие от аналогов, лавинный процесс будет производиться в полусферических $n^+ - p$ переходах, расположенных вдоль стрипов. В результате этого достигается однородный лавинный процесс на всей площади детектора.

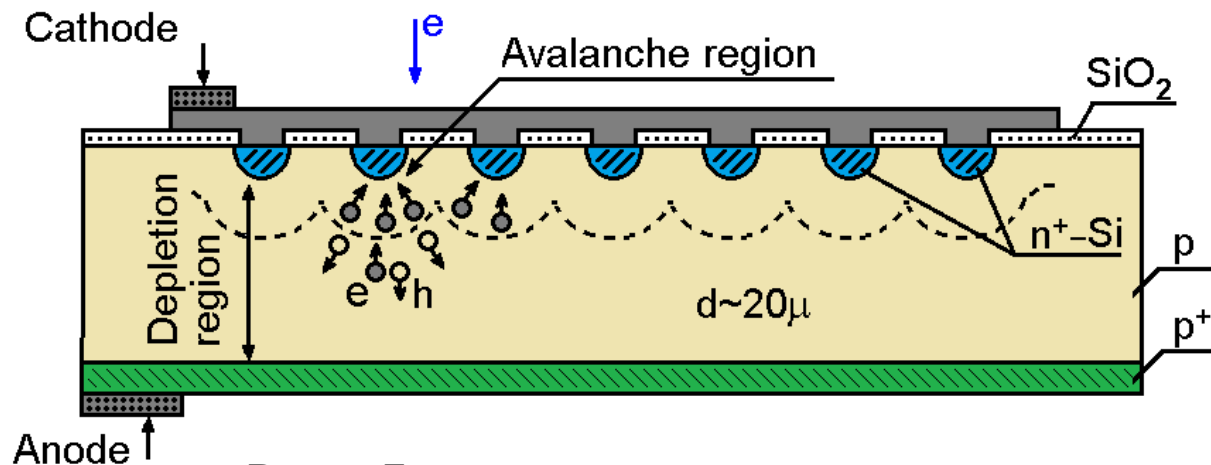


Рис.5. Лавинный стриповый детектор.

Краткое описание разработки (Новый кремниевый фотоумножитель)

Предлагается разработать новый SiPM с глубоко расположенными пикселями ($n^+ - p$ переходами). Пиксели будут иметь сферическую форму, что позволит значительно повысить радиационную стойкость детектора. В качестве гасящего лавину сопротивления будет использовано объемное сопротивление эпитаксиального слоя.

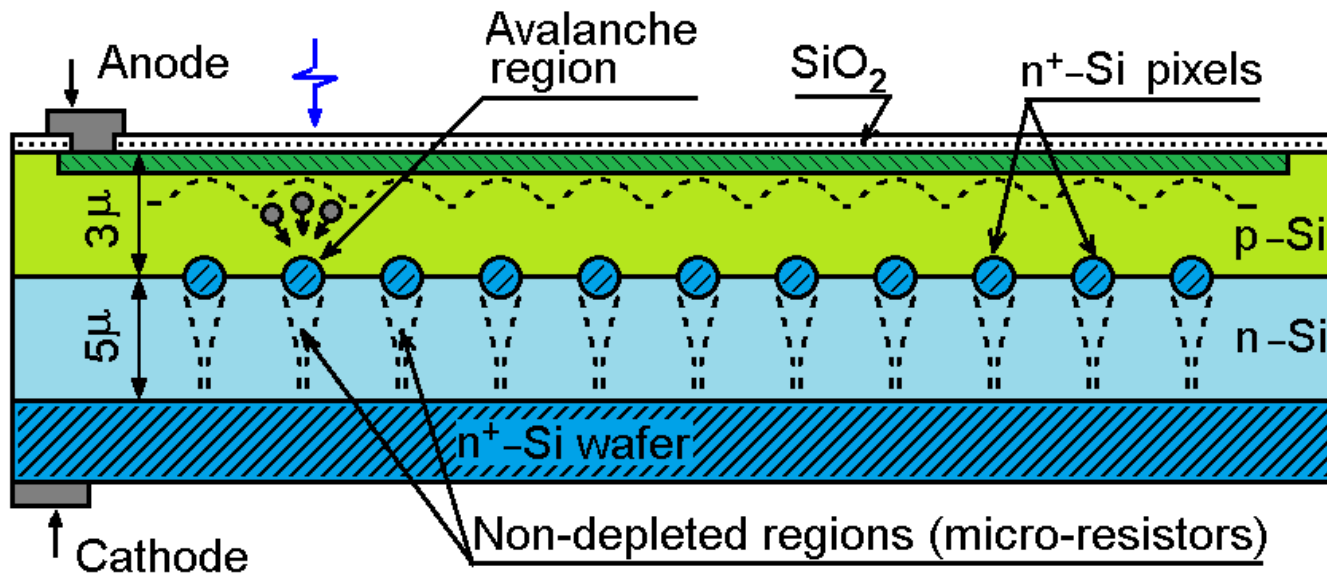


Рис.6. Микроканальный SiPM.

Краткое описание разработки (Новый кремниевый фотоумножитель)

Данная работа также предусматривает повышение быстродействия кремниевых фотоумножителей (SiPM). Дело в том, что имеющиеся в настоящее время кремниевые фотоумножители значительно уступают традиционным электровакуумным фотоумножителям по размеру фоточувствительной площади. Это связано с высокой удельной емкостью ($\sim 50 \text{ pF/mm}^2$) SiPM. Например, SiPM с рабочей площадью $6\text{мм} \times 6\text{мм}$ имеет емкость около 2000 pF , что не приемлемо для многих быстродействующих детекторов частиц.

Предлагается разработать микро-пиксельный фототранзистор, работающий в цифровом режиме.

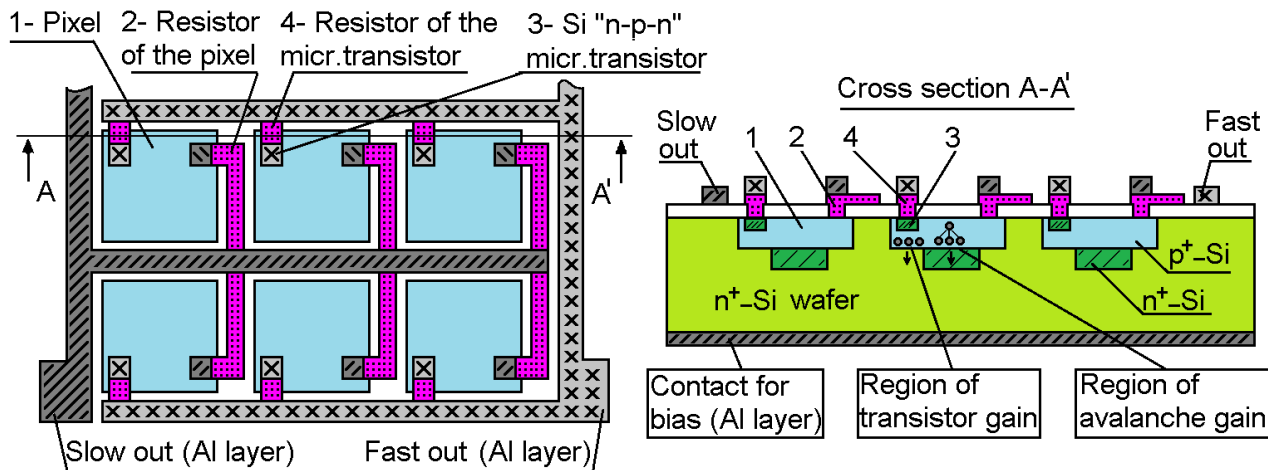


Рис.7. Микропиксельный фототранзистор

Срок выполнения проекта оценивается в три года.

Первый год работы.

1. Моделирование конструкции лавинных кремниевых детекторов.
2. Разработка и моделирование технологических процессов изготовления.
3. Изготовление первой партии тестовых лавинных детекторов и их предварительное тестирование.
4. Сборка тестовых лавинных детекторов и исследование их характеристик.

Второй год работы.

1. Исследование быстродействия и радиационной стойкости тестовых детекторов.
2. Оптимизация конструкции и технологии изготовления лавинных детекторов.
3. Изготовление второй тестовой партии лавинных кремниевых детекторов и их предварительное тестирование.
4. Сборка тестовых лавинных детекторов и исследование их характеристик.

Третий год работы.

1. Исследование быстродействия и радиационной стойкости лавинных детекторов.
2. Корректировка конструкции и технологии изготовления лавинных детекторов.
3. Изготовление основной партии лавинных кремниевых детекторов и их предварительное тестирование.
4. Сборка новых лавинных детекторов и исследование их характеристик.
5. Исследование радиационной стойкости тестовых лавинных детекторов.

Детекторы будут изготовлены в АО «Интеграл» (г. Минск, Беларусь).

Области ответственности участвующих сторон

№	Задачи проекта	Ответственная сторона	Участвующая сторона
1	Моделирование конструкции лавинных кремниевых детекторов	ЛФВЭ ОИЯИ	Азербайджан, Беларусь, Россия.
2	Разработка и моделирование технологических процессов изготовления	ЛФВЭ ОИЯИ	Азербайджан, Беларусь, Россия.
3	Изготовление лавинных детекторов и их предварительное тестирование	ЛФВЭ ОИЯИ	Беларусь, Россия.
4	Сборка лавинных детекторов и их предварительное тестирование	ЛФВЭ и ЛЯП ОИЯИ	Азербайджан, Беларусь, Россия.
5	Исследование электрических и счетных характеристик лавинных детекторов. Измерение эффективности регистрации m.i.p.	ЛФВЭ и ЛЯП ОИЯИ	Азербайджан, Беларусь, Казахстан, Россия.
6	Исследование быстродействия лавинных детекторов	БГУ (Минск, Беларусь)	Беларусь, Казахстан, Россия.
7	Исследование радиационной стойкости лавинных детекторов	ЛФВЭ и ЛНФ ОИЯИ	Азербайджан, Казахстан, Россия.

Доля занятости сотрудников

Сторона	Сотрудники	Доля участия
ОИЯИ	<u>ЛФВЭ.</u> Акберов Р. А., Бокова Т. Ю., Садыгов З. Я., Жежер В. Н.	70 %
	<u>ЛФВЭ.</u> Замятин Н. И., Копылов Ю.А., Стрелецкая Е.А., Тарасов О.Г., Топко Б.Л., Тютюнников С.И., Шереметьева А.И.	30%
	<u>ЛЯП.</u> Чалышев В. В., Чириков-Зорин И. Е.	50%
	<u>ЛЯП.</u> Анфимов Н. В., Рыбников А. В., Селюнин А. С.	10%
	<u>ЛНФ.</u> Ахмедов Г. С. к.н., Бериков Д., Копач Ю.Н., Нуруев С. М.	20%
Азербайджан	<u>НЦЯИ, г. Баку.</u> Садыгов А.З. (+2 чел.)	30%
	<u>ИРП, г. Баку.</u> Ахмедов Ф.И. (+2 чел.)	30%
Беларусь	<u>БГУ, Минск.</u> Кучинский П.В., Ермолицкий Ф.А., Макаренко Л.Ф., Ращенко Н.А. (+2 чел.).	20%
Казахстан	<u>ИЯФ, г. Алма-Ата.</u> Кенесарин М., Мухаметулы Б., Назаров К., Чубраков И.	30%

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!