

DOI: 10.18721/JPM.10407

УДК 533.9

ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ ЛАЗЕРА В ПЛАЗМЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

**А.И. Кудюкин, П.А. Борисовский, С.В. Гаврилов, М.Н. Махмудов,
Е.Н. Моос, Г.В. Киселев, Л.И. Киселева, В.А. Степанов**

Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,
г. Рязань, Российская Федерация

Влияние ионно-плазменных потоков на поверхность катода в гелий-неоновой плазме газового разряда изучено методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и электронного микрозондового анализа, включающего анализ атомного состава при профилировании по глубине и в растровом режиме. Исследования дополнялись моделированием дугового разряда в условиях вакуума дугогасительных камер вплоть до плавления сплавных металлических электродов при критических режимах разряда (в условиях повышенной мощности). Во всех случаях выявлены процессы, приводящие к деградации и разрушению поверхности катода.

Ключевые слова: плазма; ионно-плазменный поток; газовый разряд; абляция; поликристаллическая структура; морфология поверхности

Ссылка при цитировании: Кудюкин А.И., Борисовский П.А., Гаврилов С.В., Махмудов М.Н., Моос Е.Н., Киселев Г.В., Киселева Л.И., Степанов В.А. Особенности эволюции морфологии поверхности электродов лазера в плазме газового разряда // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математическая наука. 2017. Т. 10. № 4. С. 92–99. DOI: 10.18721/JPM.10407

EVOLUTION FEATURES OF LASER ELECTRODE-SURFACE MORFOLOGY IN THE GAS DISCHARGE PLASMA

**A.I. Kudyukin, P.A. Borisovsky, S.V. Gavrilov, M.N. Makhmudov,
E.N. Moos, G.V. Kiselyov, L.I. Kiselyova, V.A. Stepanov**

Ryazan State University named for S.A. Yesenin,
Ryazan, Russian Federation

The effect of plasma flows on the cathode surface in the He-Ne plasma of a gas discharge has been investigated using X-ray photoelectron spectroscopy, the electron microprobe analysis, including atomic composition analysis in the depth profiling and in the raster mode. The studies were supplemented by modeling of the arc discharge in vacuum arc-quenching chambers up to the melting of the metal-alloyed electrodes based on the two-component systems under critical discharge rate (under increased power). In all instances there were identified the processes leading to the degradation and destruction of the cathode surface. Method of electronic microprobe analysis revealed a change in the composition of chromium-copper alloy electrode in the depth due to thermal effects at all stages of production, testing and service. In the

zone of the melted electrodes, we observed redistribution of the main components and a substantial decrease in the oxygen concentration.

Keywords: plasma; ion-plasma flow; gas discharge; ablation; polycrystalline structure; surface morphology

Citation: A.I. Kudyukin, P.A. Borisovsky, S.V. Gavrilov, M.N. Makhmudov, E.N. Moos, G.V. Kiselyov, L.I. Kiselyova, V.A. Stepanov, Evolution features of laser electrode-surface morphology in the gas discharge plasma, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 10 (4) (2017) 92–99. DOI: 10.18721/JPM.10407

Введение

Физические процессы, происходящие при взаимодействии электродов с плазмой, приводят к необратимым изменениям состояния их поверхности. Сведения о процессах блистеринга (вспучивание поверхности) в приборах плазменной электроники крайне немногочисленны, и по данной теме имеются лишь единичные публикации [1, 2]. В то же время при изучении эволюции состояния катодов на основе системы Al-Mg (оксиды алюминия с добавкой оксидов магния; катоды – элементы конструкции гелий-неоновых лазеров) [3], исследованиях поверхности электродов магнитоуправляемых контактов (система Fe-Ni) [4], электродов вакуумных дуговых прерывателей (система Cu-Cr) [5] остаются невыясненными причины их деградации и разрушения. Сохраняется также актуальность исследования процессов и механизмов взаимодействия ионно-плазменных потоков с поверхностью данных сплавов и легированных электродных систем [6].

Перечисленные выше направления исследований входят в круг известных проблем, относящихся к взаимодействию ионно-плазменных потоков с поверхностью. С ними связаны процессы разрушения оболочек (абляция) летательных аппаратов в авиакосмических отраслях, оболочек реакторов атомной индустрии (особенно реакторов типа токамак), а также технологических процессов формирования пленочных систем и покрытий, в частности в микро- и нанoeлектронике.

В настоящей статье представлены результаты исследования эволюции поверхности электродов в газовом разряде (катоды гелий-неоновых лазеров) и моделирование подобных изменений морфологии двухкомпонентных электродов при развитии дуго-

вого разряда в контролируемых условиях вакуума дугогасительных камер.

Изучение такого рода сложных процессов оказалось возможным в результате применения целого комплекса методов:

рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии;

электронного микрозондового анализа при профилировании по глубине и в растровом режиме;

атомно-силовой микроскопии.

Результаты исследований и их обсуждение

При послойном анализе поверхности алюминиевого катода гелий-неонового лазера, содержащего малую концентрацию легирующих примесей магния и железа, обнаружен выраженный слой углерода на поверхности, уровень которого убывает до фонового значения на глубине в анализируемых слоях электродного материала (рис. 1). Обозначения $1s$, $2s$ и $2p$ показыва-

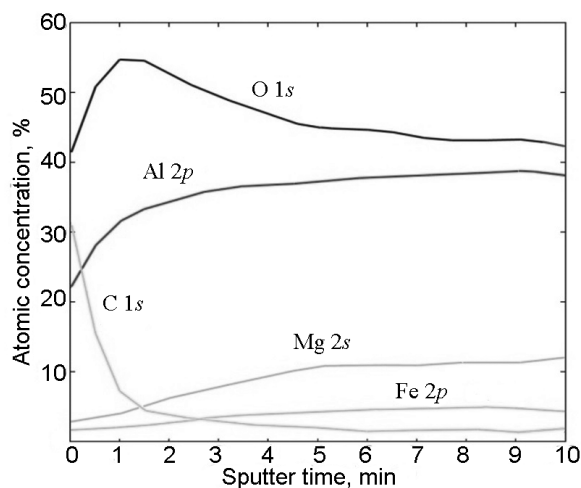


Рис. 1. Результат послойного анализа поверхности катода системы Al-Mg гелий-неонового лазера (зависимость концентрации атомов от времени распыления)

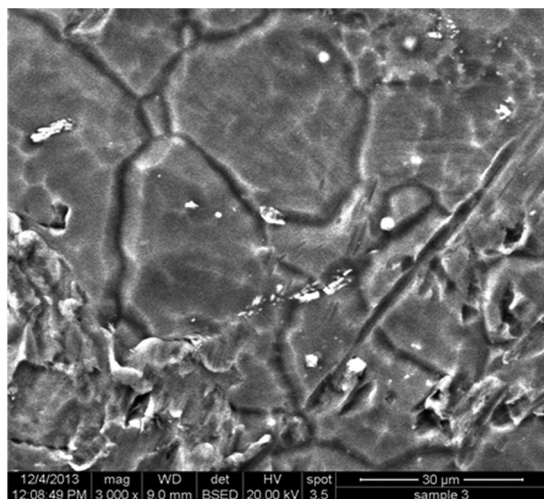


Рис. 2. Морфология поверхности катода в результате воздействия гелий-неоновой плазмы (микрофотография получена с помощью растрового электронного микроскопа)

ют заполнение электронного уровня каждым элементом.

Одновременно при этом наблюдается выраженный рост концентрации алюминия (до стабильной величины) и кислорода. Последняя, впрочем, спадает, выявляя слой повышенного окисления матрицы приповерхностной зоны. Синфазно с содержанием алюминия изменяется содержание магния, наблюдается его сегрегация на поверхность эмиссионного слоя, причем менее значительный рост его аналитического сигнала от магния, по сравнению с алюминием, подтверждает этот результат, ранее полученный методом Оже-спектроскопии [3]. Указанный метод, как известно, чувствителен к самым верхним атомным слоям.

С помощью растровой электронной микроскопии выявлено декорирование плазмой поликристаллической структуры изучаемой поверхности катода гелий-неонового лазера в результате воздействия гелий-неоновой плазмы (рис. 2). Микрокристаллиты имели средние размеры около 30 мкм.

Явление блистеринга, обнаруженное нами на поверхности катода гелий-неонового лазера, ранее было изучено на поверхности обшивки космических летательных аппаратов и в ядерных установках

типа токамак. Обычно этот эффект проявляется в условиях, когда энергия ионных пучков превышает десятки и сотни кэВ [6]. Внешний вид и атомный элементный состав блистеров на электродах гелий-неонового лазера (куполообразные образования) представлены на рис. 3, 4.

Размер блистера составляет около 40 мкм. В зоне анализа, отмеченной на рис. 3 квадратом, количество атомов неона в блистере достигает 2,11 ат.% от основного вещества катода – оксида алюминия (рис. 4). По результатам анализа методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, в поверхностном слое концентрация алюминия регистрируется на уровне 30,52 ат.%; поверхностное же состояние атомов кислорода и углерода при этом составляет в зоне анализа 62,8 и 4,49 ат.% соответственно. Эти данные коррелируют с наблюдавшимся снижением мощности излучения активных элементов, вышедших из строя. Мощность при этом упала с 0,50 мВт до 0,13 – 0,01 мВт. В то же время оптимальный рабочий ток увеличился с 3,5 до 4,1 мА, а ток срыва разряда увеличился с 3,2 до 4,2 мА.

Характер свечения разряда (бледно-синий цвет является присущим разряду гелия) указывает на снижение содержания

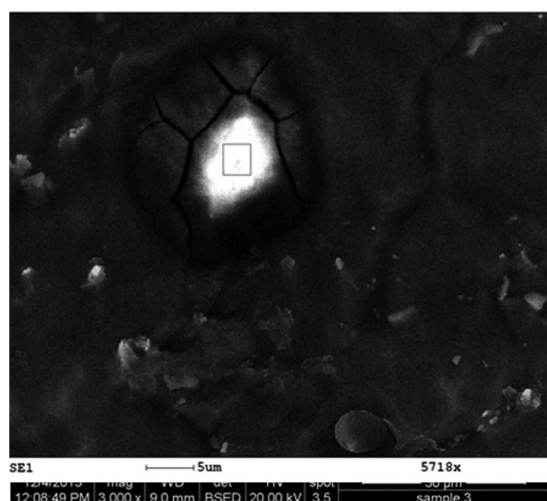


Рис. 3. Эффект блистеринга на поверхности алюминиевого катода гелий-неонового лазера после испытаний (анализируемый участок отмечен квадратом)

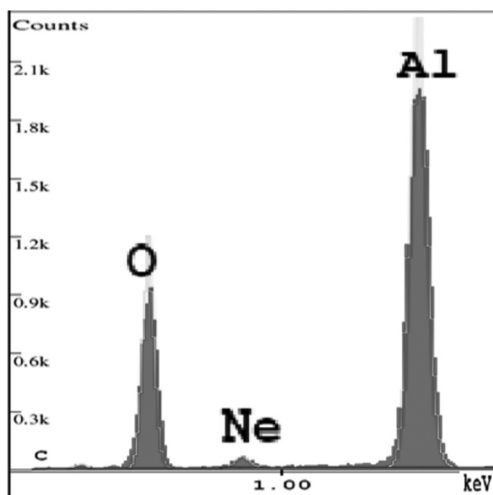


Рис. 4. Атомный состав блистера на поверхности алюминиевого катода (зона анализа отмечена квадратом на рис. 3) после 100 тыс. ч воздействия гелий-неоновой плазмы (это длительность испытания активного элемента)

неона в рабочей смеси, что можно объяснить накоплением неона в блистерах (см. рис. 3). В пользу этого объяснения говорит увеличение как оптимального рабочего тока, так и тока срыва разряда.

В ходе исследования представилось важным сравнить полученные результаты с поведением поверхности катода на основе двичной системы Cu-Cr в условиях дугового разряда (напомним, что в гелий-неоновых лазерах это система Al-Mg). Это важно для выявления общих закономерностей эволюции состава и морфологии поверхности, для изучения режимов воздействия ионно-плазменных потоков повышенной энергии в вакууме с целью определения предельной мощности разрушающих потоков. При этом исключался возможный эффект блистеринга (среда развития разряда – вакуум).

Компьютерное моделирование воздействия плазмы дугового разряда на электроды Cu-Cr в условиях вакуума, которое учитывало теплопроводность данного сплава, мощность и время существования дуги, также выявило особенности эволюции морфологии и состава их поверхности (рис. 5). В частности, концентрации атомов меди (основное вещество сплава) и кисло-

рода на поверхности оказались выше объемных значений.

Точечное электронное зондирование образцов катода системы Cu-Cr выявило зоны, содержание меди в которых снижается с 92,4 до 78,2 ат.% при увеличении глубины, что указывает на резко выраженный процесс ее сегрегации на поверхности. В катодной области существует несколько энергетических процессов в результате воздействия ионов, ускоренных в прикатодном пространстве [5]. Кроме того, автоэлектроны, инициирующие дуговой разряд, создают в центрах эмиссии высокие плотности тока, стимулирующие нагрев этой зоны; при этом процесс сопровождается разбрызгиванием вещества электродов. Данный процесс, протекающий в вакууме, вызывает снижение концентрации кислорода в зоне плавления более чем в два раза (с 4,9 до 2,2 ат.%).

Развитый рельеф поверхности, как было показано в работах [1, 7], способен значительно влиять на процессы распыления и расплавления компонентов сплава при воздействии вакуумной дуги. С увеличением угла падения ионов, связанного с морфологическими особенностями поверхности, коэффициент распыления снижается,

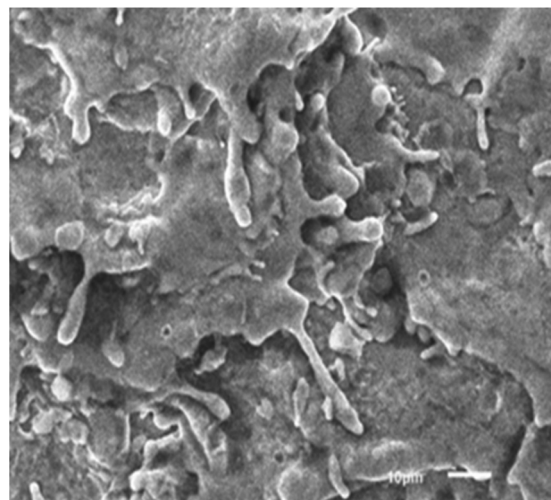


Рис. 5. Морфология поверхности катода системы Cu-Cr в результате воздействия мощного дугового разряда в условиях вакуума (итог компьютерного моделирования процесса в критическом режиме)

по сравнению с таковым для неповрежденной поверхности. Это обусловлено тем, что только часть распыленных атомов покидает поверхность, большая же их часть перераспыляется на соседние участки, изменяя коэффициент усиления поля, а следовательно, и автоэлектронные процессы в дуге.

Трансформация рельефа поверхностных слоев также способна влиять на перераспределение элементного состава [1] во время действия на них вакуумного дугового разряда. При этом существенным фактором является то обстоятельство, что в ходе этого процесса на поверхность стремятся преимущественно легкосегрегирующие вещества (атомы меди в последнем случае). Поэтому медью обогащаются области, которые в большей мере участвуют в процессе распыления, — это верхние слои и области возвышенностей; в глубоких же участках растет концентрация более тугоплавкого компонента.

Процессы сегрегации атомов магния наблюдались для катодов двойных систем Al-Mg [3] гелий-неоновых лазеров.

Заключение

В сравнительных исследованиях дугового разряда в среде активного элемента гелий-неонового лазера и в условиях вакуума выявлены общие закономерности эволюции элементов электродных материалов.

Одновременно обнаружена специфика развития дугового разряда в условиях вакуума. В частности, установлено двукратное снижение концентрации кислорода в процессе деградации электрода (с 5,0 до 2,2 ат.%) и его уход из объема электродов. Из термодинамических оценок следует, что кислород предпочтительно сконцентрирован в зонах с преобладанием легко окисляемых компонентов (в анализированных двойных катодных системах это магний и медь, соответственно).

Исследование возможных предельных изменений указанных характеристик поверхности электродов в условиях интенсивного и многократного воздействия дугового разряда на электроды камеры также обнаруживает общие закономерности гелий-неоновой среды лазера в условиях вакуума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беграмбеков Л.Б. Модификация поверхности твердых тел при ионном и плазменном воздействии. М.: МИФИ, 2001. 34 с.
2. Строкань Г.П. Процессы разрушения поверхности электрода в плазме высокочастотного разряда // ЖТФ. 2001. Т. 71. № 9. С.112–115.
3. Ерошкин М.В., Киселев Г.В., Моос Е.Н. Распыление поверхности катода He-Ne лазера // Известия РАН. Серия физическая. 2014. Т. 78. № 6. С. 686–689.
4. Арушанов К.А., Зельцер И.А., Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Маслаков К.И., Моос Е.Н., Наумкин А.В. Ионно-индуцированное модифицирование контактных поверхностей // Известия РАН. Серия физическая. 2012. Т. 76. № 6. С. 750–754.
5. Kudyukin A.I., Moos E.N., Rott A.T., Rybin N.B., Stepanov V.A. Arc interaction with electrodes // Proceed. 11th Intern. Vac. Electr. Sourc. Conf. 2016. Seoul National University (SNU). Pp. 41–42.
6. Бондарева А.Л., Змиевская Г.И. Моделирование флуктуационной стадии высокотемпературного блистеринга // Известия РАН. Серия физическая. 2004. Т. 68. № 3. С. 336–339.
7. Barkan R., Lafferty J.M., Lee T.N., Talento J.L. Development of contact materials for vacuum interrupts // IEEE. Trans. Power Appl. and Syst. 1971. Pp. 1–9.
8. Гаврилов С.В., Моос Е.Н. Появление структурных особенностей на потенциальном барьере // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 2. С. 225–226.
9. Зельцер И.А., Кукушкин С.А., Моос Е.Н. Характеристики ионной и электронной эмиссии при модуляции потенциального барьера // Известия РАН. Серия физическая. 2008. Т. 72. № 7. С. 873 – 877.
10. Лукацкая И.А. Исследование коммутационного ресурса вакуумных дугогасительных камер // Сборник статей сотрудников ВЭИ им. В.И. Ленина «Вакуумные дугогасительные камеры». 2008. С. 126–129.
11. Белкин Г.С., Лукацкая И.А. Исследование свариваемости контактов вакуумных дугогасительных камер // Сборник статей сотрудников ВЭИ им. В.И. Ленина «Вакуумные дугогасительные камеры». 2008. С. 130–135.

Статья поступила в редакцию 06.10.2017, принята к публикации 11.10.2017.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КУДЮКИН Александр Игоревич — аспирант кафедры общей и теоретической физики и методики преподавания физики Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина, г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Свободы, 46
a.kudykin@rsu.edu.ru

БОРИСОВСКИЙ Петр Андреевич — научный сотрудник кафедры общей и теоретической физики и методики преподавания физики Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина, г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Свободы, 46
borisovsky@physicist.net

ГАВРИЛОВ Сергей Владимирович — научный сотрудник кафедры общей и теоретической физики и методики преподавания физики Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина, г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Свободы, 46
Gavrilov@physicist.net

МАХМУДОВ Марат Наильевич — кандидат физико-математических наук, начальник управления научной и инновационной деятельности Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина, г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Свободы, 46
Makhmudov@physicist.net

МООС Евгений Николаевич — доктор технических наук, профессор кафедры общей и теоретической физики и методики преподавания физики Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина, г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Свободы, 46
Moos@physicist.net

КИСЕЛЕВ Георгий Владимирович — научный сотрудник кафедры общей и теоретической физики и методики преподавания физики Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина, г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Свободы, 46
Kiselyov@physicist.net

КИСЕЛЕВА Людмила Ивановна — научный сотрудник кафедры общей и теоретической физики и методики преподавания физики Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина, г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Свободы, 46
Kiselyova@physicist.net

СТЕПАНОВ Владимир Анатольевич — доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей и теоретической физики и методики преподавания физики Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина, г. Рязань, Российская Федерация.

390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Свободы, 46
stepanov@physicist.net

REFERENCES

[1] **L.B. Begrambekov**, Modifikatsiya poverkhnosti tverdykh tel pri ionnom i plazmennom vozdeystvii [Modifying the solid surface under ionic and plasmous attacks], Moscow, MIFI, 2001.

[2] **G.P. Strokan**, Electrode surface erosion in a high-frequency discharge plasma, ЖТФ. 46 (9) (2001) 1175–1178.

[3] **M.V. Eroshkin, G.V. Kiselev, E.N. Moos**,

Sputtering the surface of a He-Ne laser cathode, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 78 (6) (2014) 485–488.

[4] **K.A. Arushanov, I.A. Zeltser, S.M. Karabanov, et al.**, Ion-induced modification of contact surfaces, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 76 (6) (2012) 669–673.

[5] **A.I. Kudyukin, E.N. Moos, A.T. Rott, et al.**, Arc interaction with electrodes, Proceed. 11th Inter. Vac. Electr. Sourc. Conf., Seoul National University (SNU). (2016) 41–42.

[6] **A.L. Bondareva, G.I. Zmiyevskaya**, Fluctuation stage simulation of a high-temperature blistering, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 68 (3) (2004) 336–339.

[7] **R. Barkan, J.M. Lafferty, T.N. Lee, et al.**, Development of contact materials for vacuum interrupts, IEEE, Trans Power Appl. and Syst. 90 (1971) 1–9.

[8] **S.V. Gavrilov, E.N. Moos**, Structural features at potential barrier, Journal of Communications Technology and Electronics. 55 (2) (2010) 225–226.

[9] **I.A. Seltzer, S.A. Kukushkin, E.N. Moos**, Ion and electron characteristics at potential barrier modulation, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 72 (7) (2008) 873–877.

[10] **I.A. Lukatskaya**, Issledovanie kommutatsionnogo resursa vakuumnyh dugogasitel'nyh kamer [Investigation of a commutation life of vacuum arc-quenching chambers], Sbornik statey sotrudnikov VEI im. V.I. Lenina «Vakuumnye dugogasitel'nye kamery» (2008) 126–129.

[11] **G.S. Belkin, I.A. Lukatskaya**, Issledovanie svarivaemosti kontaktov vakuumnyh dugogasitel'nyh kamer [Investigation of contacts' weldability of vacuum arc-quenching chambers], Sbornik statey sotrudnikov VEI im. V.I. Lenina «Vakuumnye dugogasitel'nye kamery» (2008) 130–135.

Received 06.10.2017, accepted 11.10.2017.

THE AUTHORS

KUDYUKIN Alexander I.

Ryazan State University named for S.A. Yesenin
40 Svobody St., Ryazan, 390000, Russian Federation
a.kudyukin@rsu.edu.ru

BORISOVSKY Pyotr A.

Ryazan State University named for S.A. Yesenin
40 Svobody St., Ryazan, 390000, Russian Federation
borisovsky@physicist.net

GAVRILOV Sergey V.

Ryazan State University named for S.A. Yesenin
40 Svobody St., Ryazan, 390000, Russian Federation
Gavrilov@physicist.net

MAKHMUDOV Marat N.

Ryazan State University named for S.A. Yesenin
40 Svobody St., Ryazan, 390000, Russian Federation
Makhmudov@physicist.net

MOOS Evgueniy N.

Ryazan State University named for S.A. Yesenin
40 Svobody St., Ryazan, 390000, Russian Federation
Moos@physicist.net

KISELYOV Georgiy V.

Ryazan State University named for S.A. Yesenin
40 Svobody St., Ryazan, 390000, Russian Federation
Kiselyov@physicist.net

KISELYOVA Lyudmila I.

Ryazan State University named for S.A. Yesenin
40 Svobody St., Ryazan, 390000, Russian Federation
Kiselyova@physicist.net



STEPANOV Vladimir A.

Ryazan State University named for S.A. Yesenin
40 Svobody St., Ryazan, 390000, Russian Federation
stepanov@physicist.net