

Формирование наноразмерных элементов затворов СВЧ-транзисторов методом ионно-лучевой литографии

К.К. Лаврентьев, В.К. Неволин, Р.Ю. Розанов, К.А. Царик, А.А. Зайцев

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Formation of Nanosize Elements of Microwave Transistors Gates by Ion Beam Lithography

K.K.Lavrentyev, V.K.Nevolin, R.Yu.Rozanov, K.A.Tsarik, A.A.Zaitsev

National Research University of Electronic Technology, Moscow

Изложена методика формирования наноразмерного затвора мощного СВЧ-транзистора. Определены оптимальные параметры экспонирования резистов 950-ПММА-А2 и ЭЛП-20. Исследован технологический маршрут ионно-лучевой литографии с применением многослойных резистов. Отработана технология создания непрерывной сетки заземленных знаков совмещения поверх чувствительного к ионам резиста для визуализации знаков совмещения на диэлектрической подложке методом ионной микроскопии.

Ключевые слова: ионно-лучевая литография; СВЧ-транзистор; фокусированный ионный пучок; полиметилметакрилат; ионная микроскопия; знаки совмещения; многослойный резист.

The techniques for forming the nanoscale elements of gate of the power microwave transistor, based on the AlN/GaN heterostructures, have been developed. The optimal parameters of exposure of 950-polymethylmethacrylate (PMMA) and ELP-20 have been defined. The technological route of ion beam lithography using the multilayer resists has been developed and investigated. The technology for creating the grounded continuous metal mesh of the alignment marks above the resist, sensitive to ions, for visualizing the alignment marks on the dielectric substrate by ion microscopy method has been completed.

Keywords: ion beam lithography; high electron mobility transistor; focused ion beam; nitride electronics; polymethylmethacrylate; scanning gallium-ion microscopy; alignment marks.

Введение. В настоящее время в отечественной и мировой СВЧ-электронике решается проблема увеличения крутизны и рабочей частоты мощных полевых транзисторов. Одним из методов улучшения данных электрофизических характеристик приборов является уменьшение размеров элементов, в частности создание наноразмерных затворов. Элементы современных электронных приборов размером 200 нм и менее обычно создаются методами проекционной фотолитографии или литографии с экстремальным ультрафиолетом, требующими использования крайне дорогостоящих оборудования и

фотошаблонов [1], либо электронно-лучевой литографии, одним из основных недостатков которой является очень низкая производительность.

Для мелкосерийного изготовления микро- и нанoeлектронных приборов желательно использовать литографический метод, не требующий изготовления шаблонов (безмасочный) и отличающийся при этом высокой производительностью. Таким методом является ионно-лучевая литография, имеющая ряд преимуществ относительно электронно-лучевой. Ионы обладают большей массой по сравнению с электронами и поэтому отдают свою энергию более эффективно, а рассеяние пучка при этом меньше [2]. Дифракционные ограничения практически отсутствуют ввиду крайне малой длины волны де Бройля ионов. Боковое рассеяние ионов при их проникновении в вещество и обратное рассеяние ионов от подложки незначительны, а вторичные электроны, инициированные ионным пучком, имеют малую энергию по сравнению с электронной литографией и, следовательно, малую длину свободного пробега. В результате отсутствует нежелательное паразитное экспонирование соседних областей в объеме резиста и влияние эффекта близости крайне мало. Обратное рассеяние ионов от подложки также минимально, поэтому разрешающая способность ионно-лучевой литографии выше, чем электронно-лучевой. Кроме того, резисты имеют значительно большую чувствительность к ионам, следовательно, при ионно-лучевой литографии продолжительность экспонирования меньше, чем при электронно-лучевой (доза экспонирования различается на 2–3 порядка) [3].

Производительность ионно-лучевой литографии самая высокая по сравнению со всеми литографическими методами, не требующими изготовления дорогостоящих шаблонов. Фокусированный ионный пучок (ФИП) отличается большой глубиной фокуса (>10 мкм), что позволяет увеличить расстояние между точками настройки фокусировки луча на обрабатываемой подложке. В отличие от экспонирования потоком электронов резист полностью поглощает поток ионов, поэтому в ионно-лучевой литографии исключены радиационные повреждения подложки [1]. С помощью ионного пучка также возможно локальное легирование материала подложки или нанесенного на подложку слоя. Данный метод для создания наноразмерного рельефа на поверхности кремниевой пластины с применением плазмохимического травления рассмотрен в работе [4].

Большинство как позитивных, так и негативных резистов, чувствительных к ионам, являются полимерами. При взаимодействии полимерных резистов с электронным пучком может происходить структурирование или деструкция полимерной цепи, однако для большинства полимеров оба процесса идут одновременно. Поскольку скорость проявления зависит от молекулярной массы резиста, в случае преобладания полимеризации резист становится негативным, а в случае деструкции – позитивным. При достаточно малых дозах экспонирования узких протяженных структур как на позитивных, так и на негативных резистах в ряде случаев наблюдался эффект прерывистой линии, заключающийся в периодических разрывах в проэкспонированной структуре и связанный либо с дробовым шумом, либо с осцилляциями в конусе Тейлора жидкометаллического источника ионов галлия [5].

Максимально достигнутое разрешение при использовании полиметилметакрилата (ПММА) как позитивного резиста составляет 10 нм [6], как негативного – 50 нм [7]. Размеры элемента порядка 100 нм и менее достигались также при использовании для ионно-лучевой литографии негативных резистов, например резиста SPR 660 в технологическом процессе NERIME [8]. Позже разрешение выше 10 нм было достигнуто при экспонировании галлиевым ионным пучком негативного резиста HSQ [5].

В настоящей работе рассмотрена методика создания протяженных нанолитографических структур с помощью литографии фокусированным ионным пучком с применением основных коммерчески доступных резистов, в частности разработана методика формирования протяженных наноразмерных металлических элементов затворов для СВЧ-транзистора методом ионно-лучевой литографии.

Эксперимент. Для экспериментов по проведению ионно-лучевой литографии использовалось следующее оборудование: сверхвысоковакуумная колонна фокусированного ионного пучка Magnum BDS-200 фирмы FEI в составе нанотехнологического комплекса «Нанофаб-100» фирмы NT-MDT, центрифуги для нанесения резистов, термошкаф для сушки. Выбраны резисты 950-PMMA-A2 фирмы Microchem и ЭЛП-20 производства предприятия «Ниопик». Проведено экспонирование с дозами воздействия ионного пучка от 1 до 1000 фКл/мкм² (энергия ионов Ga⁺ 30 кэВ, ток пучка 1 пА либо 30 пА) и проявление в смеси изопропилового спирта и воды в соотношении 8:1. Форма, размеры и положение создаваемых в процессе ионно-лучевой литографии элементов электронных приборов и схем задаются в файле-шаблоне, который генерируется с помощью программы [9]. Глубина проявления тестовых линий и квадратов измерялась методом атомно-силовой микроскопии.

Для создания непрерывной сетки знаков совмещения использовалась бесшаблонная лазерная фотолитография. Экспонирование ФП-617 проводилось с помощью зеленого лазера с длиной волны 532 нм, время воздействия в точке – 500 мкс, расстояние между точками воздействия (шаг двигателя) – 1,45 мкм, ширина линии – 3 мкм. Топология для бесшаблонной лазерной фотолитографии создавалась в программе AutoCad 2007 и сохранялась в формате *.dxf. Программа, написанная специально для эксплуатации данной установки литографии на языке С++, конвертировала файл формата *.dxf в набор координат концов отрезков прямых линий и противолежащих углов прямоугольников, вводимый в программу, управляющую микроконтроллером Atmega-16 компании ATMEL и написанную также на языке С++. Нанесение металлизации выполнялось методом магнетронного напыления на установке Emitech K575X. Кроме того, вследствие малой длины свободного пробега ионов при 30 кэВ (не более 100 нм) ограничена толщина слоя резиста ПММА, что вносит ограничение максимальной толщины напыляемого металла (не более половины толщины резиста) для эффективного «взрыва». Для создания топологических элементов толщиной более 50 нм использовался трехслойный резист с комбинированным процессом проявления. В качестве нижнего слоя применялся фоторезист LOR толщиной 400 нм, на него методом плазмохимического осаждения наносился слой нитрида кремния толщиной 50 нм, в качестве верхнего слоя – резисты ПММА или ЭЛП толщиной 100 нм. Для межоперационного и послеоперационного контроля топологии тестовых и транзисторных структур использовалась оптическая, атомно-силовая, ионная и электронная микроскопия. Оптическая микроскопия проводилась на оборудовании компании NST Centaur U HR: окуляр с увеличением 10× и объективы 10×, 50× и 100×.

Результаты и обсуждение. В результате экспериментов по нахождению оптимальных параметров экспонирования ПММА при его использовании в качестве позитивного резиста для ионно-лучевой литографии получена зависимость наблюдаемых при экспонировании эффектов от дозы экспонирования (рис.1).

Примем за D_1 дозу, при которой наблюдалось растворение проэкспонированных участков резиста в 2-пропанол на всю толщину слоя. При этих условиях резисты ПММА и ЭЛП можно использовать как позитивные. Как следует из рис.1, глубина проявления резиста возрастает до толщины слоя при увеличении дозы экспонирования

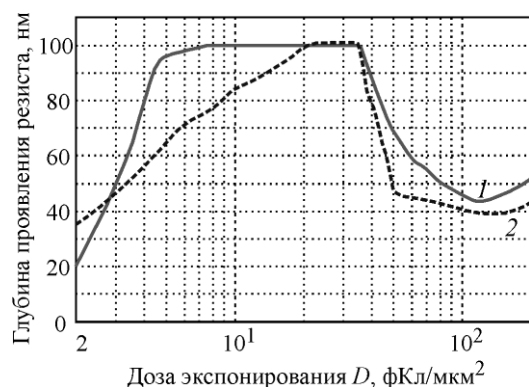


Рис.1. Зависимости глубины проявления резистов 950-ПММА-А2 (кривая 1) и ЭЛП-20 (кривая 2) от дозы экспонирования ионным пучком Ga^+

до 8 фКл/мкм² для резиста ПММА и до 20 фКл/мкм² для резиста ЭЛП-20. Найденный оптимальный режим экспонирования для резиста ПММА соответствует дозам 8–30 фКл/мкм², для резиста ЭЛП – 25–34 фКл/мкм². При увеличении времени воздействия ФИП (при дозе D_2) наблюдалась полимеризация резиста, глубина проявления убывала с увеличением дозы экспонирования, пока не начиналось травление резиста. Возможные механизмы полимеризации связаны с нагреванием резиста ионным пучком либо воздействием галлия как катализатора. Определены значения дозы D_2 , при которой происходит

нежелательная для литографии полимеризация резиста: 30–150 фКл/мкм² для ПММА и 35–150 фКл/мкм² для ЭЛП-20. При еще большем увеличении дозы экспонирования D_3 происходило травление резиста ионным пучком: для ПММА и ЭЛП-20 $D_3 \geq 180$ фКл/мкм².

При сканировании структур с дозой экспонирования D_2 наблюдались краевые эффекты: на границах квадратов ввиду рассеяния ионов имелись наноразмерные области, проэкспонированные с дозой, близкой к D_1 , поэтому происходило растворение резиста в данных областях, вызывающее образование канавок на поверхности образца. При дозе (D_3) также наблюдались краевые эффекты. После проявки по контуру вытравленной области получали наноразмерные полимеризованные полосы и проявленные наноразмерные канавки.

Найденные режимы экспонирования полезны только в случае эффективного совмещения на каждом этапе маршрута литографии.

Совмещение в процессе ионно-лучевой литографии на изолирующих и полуизолирующих подложках невозможно ввиду накопления зарядов и, следовательно, отсутствия вторичных электронов для визуализации изолированных металлических знаков методом ионной микроскопии. Существуют два способа решения этой проблемы. Первый способ подразумевает нанесение тонкой металлической пленки на поверхность резиста. Однако ионный пучок рассеивается от металлических частиц, что не позволяет получить максимального разрешения при экспонировании. Второй способ заключается в создании заземленных знаков совмещения, визуализируемых с помощью ионной микроскопии и размещенных по всей подложке; он предпочтителен, так как не закрывает область экспонирования.

Таким образом, для позиционирования образца под ионным пучком отработан процесс лазерной оптической литографии знаков совмещения по программному шаблону. Использовались знаки совмещения, заранее вытравленные ионным пучком в нитридной гетероструктуре с параметрами травления: энергия пучка 30 кэВ, ток пучка 20 нА, доза воздействия 0,5 нКл/мкм², фигуры в виде креста из двух полос шириной 3 мкм и длиной 30 мкм в узлах будущей металлической сетки (рис.2).

Формирование знаков совмещения в гетероструктуре и совмещение ионно-лучевой литографии по непрерывной сетке проводились на трехслойном резисте. Разработаны основные стадии маршрута, показанного на рис.3. Маршрут заключался в нанесении многослойного резиста, экспонировании и проявлении верхнего слоя фоторезиста для знаков совмещения ионно-лучевой литографии (КОН, 0,5%, 30 с), напылении металла

знаков совмещения на резист ПММА (хром, 80 нм), «взрыва» фоторезиста (KOH, 15%, в вертикальном положении), экспонирования резиста ионным пучком и его проявления. Перенос литографического рисунка на нижние слои резиста осуществлялся методами плазмохимического травления Si_3N_4 (в плазме CHF_3) и LOR (в плазме O_2). Затем выполнялось напыление многослойной металлической пленки и «взрыв» LOR в диметилформамиде.

Процессы обратной фотолитографии знаков совмещения на поверхности элек-

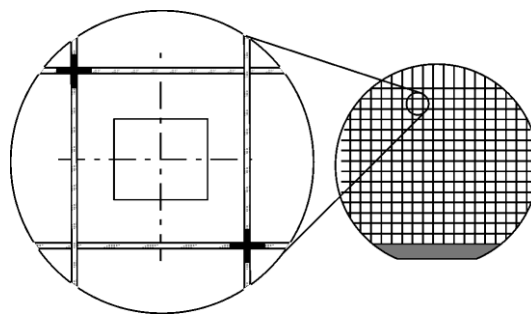


Рис.2. Непрерывная металлическая сетка знаков совмещения, создаваемая на поверхности электронного резиста

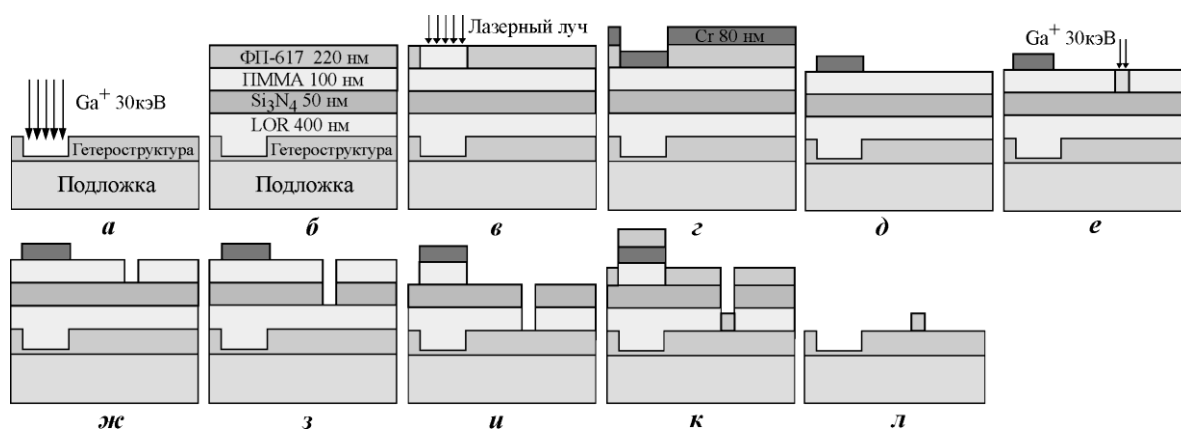


Рис.3. Маршрут ионно-лучевой литографии наноразмерных элементов затвора для транзистора на основе гетероструктур AlN/GaN : а – ионное травление знаков для оптического совмещения; б – нанесение многослойного резиста; в – экспонирование и проявление фоторезиста для знаков совмещения в ионной литографии; г – напыление металла знаков совмещения на ПММА; д – «взрыв» фоторезиста; е – экспонирование ионным пучком; ж – проявление ПММА; з – травление маски Si_3N_4 в плазме CHF_3 ; и – травление LOR в плазме O_2 ; к – напыление металлов затвора; л – «взрыв» LOR

тронного резиста (с применением фоторезиста ФП-617) не влияют на свойства ПММА, в частности на растворимость в проявителе, так как ПММА не взаимодействует с химикатами, используемыми в процессе фотолитографии.

Для точного контроля совмещения топологии элементов транзистора по заземленной металлической сетке применялся метод ионной микроскопии с максимальным разрешением 7 нм при токе ионного пучка 1 пА. При шаге пучка при сканировании 400 нм доза воздействия ФИП составляет $0,02 \text{ фКл/мкм}^2$, что недостаточно для экспонирования резиста. Как видно из рис.1, доза для экспонирования резиста ПММА толщиной 20 нм должна составлять не менее 2 фКл/мкм^2 . При сканировании ионным пучком на фоне еле видимого рельефа контактов транзистора под резистом резко отличалась высокой яркостью металлическая заземленная сетка, созданная лазерной литографией. Позиционирование с использованием знаков совмещения подобных размеров проводилось с точностью 100 нм.

С применением данной методики совмещения выполнена литография тестовых протяженных структур затворов (рис. 4) и наноразмерных элементов затворов макетных образцов СВЧ-транзисторов. Контроль топологии транзисторных структур методом атомно-силовой и ионной микроскопии подтверждает точность воспроизведения

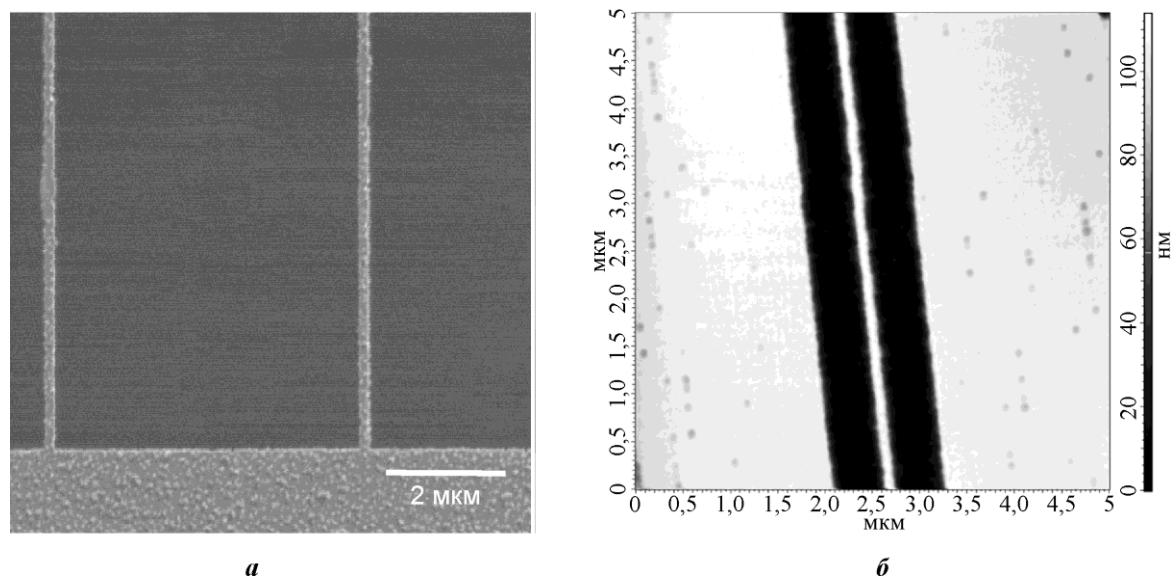


Рис.4. Изображение тестовой топологии ножек Т-образных затворов во вторичных электронах, инициированных ионным пучком (а) и АСМ-изображение макета транзистора (б)

размеров элементов прибора и отсутствие дефектов. На рис.4,а показаны тестовые протяженные структуры, а рис.4,б демонстрирует совмещение затвора в зазоре между омическими контактами стока и истока, расстояние между которыми составляет 1 мкм. Продолжительность экспонирования одной полосы затвора шириной 200 нм и длиной 200 мкм составила 320 мс при апертуре ионного пучка 1 пА и 10 мс при апертуре ионного пучка 30 пА.

Заключение. Полученные структуры демонстрируют возможность создания различных наноразмерных элементов СВЧ-транзисторов и других электронных приборов и схем методом ионно-лучевой литографии независимо от материала и электрического сопротивления подложки и сформированных на ее поверхности слоев.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14 575 21 0019, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57514X0019).

Литература

1. **Wanzenboeck H.D., Waide S.** Focused Ion Beam Lithography // Recent Advances in Nanofabrication Techniques and Applications. – 2011. – Dec. – P. 27–50.
2. **Yongqi Fu, Ngoi Kok Ann Bryan.** Focused ion beam direct fabrication of microoptical elements: features compared with laser beam and electron beam direct writing // Innovation in Manufacturing Systems and Technology (IMST). – 2004. – P. 1–7.
3. **Joshi-Imre A., Bauerdick S.** Direct-write ion beam lithography // J. of Nanotechnology. – 2014. – Vol. 2014. – P. 170415-1 – 170415-26.
4. **Bobrinetskii I.I., Nevolin V.K., Tsarik K.A., Chudinov A.A.** A distribution of Ga⁺ ions in a silicon substrate for nanodimensional masking // Russian Microelectronics. – 2014. – Vol. 43. – N. 1. – P. 15–20.
5. High resolution and high density ion beam lithography employing HSQ resist / **L. Bruchhaus, S. Bauerdick, L. Peto et al.** // Microelectronic Engineering. – 2012. – Vol. 97. – P. 48–50.
6. A low magnification focused ion beam system with 8 nm spot size / **R.L. Kubena, J.W. Ward, F.P. Stratton et al.** // Vac. Sci. Technol. – 1991. – Vol. 9. – N. 6. – P. 3079–3083.
7. **Deckert C.A., Peters D.A.** Optimization of thin film wetting and adhesion behavior // Thin solid films. – 1980. – Vol. 68. – Iss. 2. – P. 417–420.
8. Focused ion beam lithography: overview and new approaches / **K. Arshak, M. Mihov, A. Arshak et al.** // Proc. 24th International Conference on Microelectronics (MIEL 2004). – 2004. – Vol. 2. – P. 459–462.

9. Bessonova A.V., Nevolin V.K., Romashkin A.V., Tsarik K.A. Systematic features of the formation of semiconductor nanostructures using a focused ion beam // Semiconductors. – 2012. – Vol. 46.– N. 13. – P. 1604–1607.

Статья поступила
21 сентября 2015 г.

Лаврентьев Кирилл Константинович – аспирант кафедры квантовой физики и наноэлектроники (КФН) МИЭТ, младший научный сотрудник Научно-образовательного центра «Зондовая микроскопия и нанотехнология» (НОЦ ЗМНТ) МИЭТ. *Область научных интересов:* нанотехнология, наноэлектроника, ионная литография, транзисторы с высокой подвижностью электронов, нитридная электроника, молекулярно-лучевая эпитаксия, атомно-силовая микроскопия, СВЧ-электроника.

Неволин Владимир Кириллович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры КФН МИЭТ, руководитель НОЦ ЗМНТ МИЭТ. *Область научных интересов:* зондовая микроскопия, зондовая нанотехнология, наноэлектроника с элементной базой на основе квантовых проводов. **E-mail:** vkkn@miee.ru

Розанов Роман Юрьевич – аспирант кафедры КФН МИЭТ, младший научный сотрудник НОЦ ЗМНТ МИЭТ. *Область научных интересов:* нанотехнология, зондовая микроскопия, мемристор, полимерные пленки, тонкие пленки.

Царик Константин Анатольевич – кандидат технических наук, ведущий инженер-технолог НОЦ ЗМНТ МИЭТ. *Область научных интересов:* зондовая микроскопия, нанотехнология и наноэлектроника.

Зайцев Алексей Александрович – кандидат технических наук, инженер кафедры КФН МИЭТ. *Область научных интересов:* СВЧ-электроника, наноимпринт-литография.

ОПЕЧАТКИ

В журнале «Известия вузов. Электроника» Том 20, №5, 2015 допущена опечатка.

В статье «Научно-техническая деятельность МИЭТ» авторов Гаврилов С.А., Рыгалин Б.Н. на с. 467 после последнего абзаца следует читать:

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (договор №02.G25.31.0059 от 08.04.2013 г.).

С.А. Гаврилов,
доктор технических наук, профессор,
проректор по научной работе МИЭТ
Б.Н. Рыгалин,
доктор технических наук, профессор,
директор НИИ электронной техники МИЭТ