

СОЗДАНИЕ В НИИМЭ ПЕРВЫХ СВЕРХБЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ИС ЭСЛ ТИПА НА ОСНОВЕ САМОСОВМЕЩЕННЫХ И СВЕРХТОНКИХ СТРУКТУР ДЛЯ ПРОТИВОРАКЕТНОГО ЩИТА РОССИИ

Н.М. Луканов, д.т.н.

1. ВЗГЛЯД НА ПРОБЛЕМУ ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ ВРЕМЕНИ

На острие прогресса – по лезвию бритвы

В переломные моменты истории взгляд на проблему через призму времени может менять сознание и разные люди дают одним и тем же событиям противоречивые толкования – только документы могут внести более или менее выверенную ясность, к сожалению, их часто теряют или уничтожают совсем.

В статье [1] дана дорожная карта с вехами разработок и реальных событий, иногда остросюжетных, порой детективных, связанных с рассматриваемой проблемой создания в НИИ Молекулярной Электроники (НИИМЭ) отечественных конструктивно-технологических базисов (КТБ) для первых в стране сверхбыстродействующих серий ИС эмиттерно-связанной логики (ЭСЛ), нашедших применение для различных систем народного хозяйства и стратегических систем для построения противоракетного щита России [П1.1 – П1.12]:

- 1964-1965 гг. – Разработка новой технологии диффузии Р из жидкого источника диффузанта трёххлористого фосфора PCl_3 для микро мощных транзисторных структур и первых отечественных твёрдотельных схем ИС100 в НИИ-35 (“Пульсар”) [1];
- 1966-1967 гг. – Автоматизация процессов диффузии бора и фосфора в НИИМЭ. Создание первых отечественных ультратонкослойных транзисторных самосовмещённых структур (УТС), сейчас известных как “нано-ТС по вертикали” (НИР “Ингредиент”[2]);
- 1968-1969 гг. – Разработка технологий создания ТС на тонких (“Т”) и сверхтонких (“С”) профилях легирования (НИР “Ингредиент-1”[3]);
- 1968 г. – Разработка УТС с пассивным эмиттером на основе слоя (Si^*-P) – поликристаллического кремния, легированного фосфором в процессе его эпитаксиального осаждения. Имеется Акт о приоритете;

- 1969-1970 гг. – Разработка новой отечественной “эпипланарной” технологии с боковой диэлектрической изоляцией и селективной эпитаксией на “С” слоях для ИС ЭСЛ типа с рекордным (для того времени) значением среднего времени задержки распространения сигнала $t_{зр} = 0,5$ нс и схем оперативной памяти ОЗУ большой ёмкости (ОКР «Процесс-2», часть 1 [4]. Защищено Авторским свидетельством (А.с.) СССР;

- 1969-1970 гг. – Разработка и внедрение групповых процессов диффузии В, Р, As, Au (ОКР «Процесс-2», часть 2 [5]);

- 1969-1970 гг. – Создание планарной технологии для сверхбыстродействующих ИС ЭСЛ типа серии К138 на мелком (“М”) профиле с $t_{зр} = 1,9$ нс на логический вентиль для ЭВМ “Ряд-2” (НИР «Искра» [6]);

- 1970-1975 гг. – Создание и серийный выпуск высоконадёжных серий 100, 500, 700 сверхбыстродействующих ИС ЭСЛ типа с $t_{зр} = 1,5$ нс на базовый логический элемент для многопроцессорных вычислительных комплексов (МВК) системы “Эльбрус-2” [7-30]. Руководством 6-ти предприятий МЭП СССР подписано 18 Актов о приоритете и внедрении разработок, проведённых Лукановым Н.М. в НИИМЭ и отражённых в 1-ом экземпляре (хранитель ГПНТБ) его докторской диссертации.

- 1985 г. – в Институте точной механики и вычислительной техники (ИТМ и ВТ) в серийное производство был запущен МВК системы «[Эльбрус-2](#)». Он строился на «ИС-100» и «ИС-700». Этот МВК достигал производительности в 125 Мфлопс. Благодаря своему быстродействию и отказоустойчивости, он в течение многих лет использовался в центральных объектах стратегических систем страны. В книгах [28-30] приведены воспоминания некоторых участников событий, связанных с созданием этих систем.

- 1975-1991 гг. – Работа на кафедре ИПС (ФТИМС) МИЭТ. Поиск прорывных технологий и структур. Дальнейшее развитие УТС структур на принципах целенаправленного формо- и структурообразования (включая самосопряженные процессы самосовмещения и самоформирования) для исследования и проектирования ультрабыстродействующих УБИС – элементной базы гига- и терагерцовых систем обработки информации по всеоюзному конкурсному проекту [31].

- 1996 г. – Защита докторской диссертации в НПК ТЦ МИЭТ [32].

- Исследование и разработка процессов и УТС для УБИС [33-37].

Год 1964 был особенно удачным. Разработав и внедрив на завод в НИИ «Пульсар» новую отечественную технологию диффузии фосфора из жидкого источника диффузанта PCl_3 для микромощных

транзисторных структур и первых отечественных твёрдотельных схем ИС100, стал старшим инженером, получил повышение в окладе и возможность насладиться чудесным воздухом и красотами горного курорта Домбая. Сама Природа здесь преподносит человеку бесценную награду – удивительной красоты чаши Кавказа из кристально чистого и искристого снега (Рис. 1).



Рис. 1. Чаши Кавказа из кристально чистого и искристого снега

А осенью 1965 г. в Пульсаре, не ожидая того, я неожиданно познакомился с будущим директором Валиевым Камилем Ахметовичем [30]. Вместе с начальником сектора №2 Дьяковым Юрием Николаевичем он не только изучал новую отечественную технологию изготовления ИС100, но и осуществлял подбор кадров для своего п/я. В поле их зрения попал и я. Начальник разрабатывающего отдела Б.В.Малин, главный конструктор первой серии ИС100, рассказал гостям из Зеленограда о достижениях своего отдела, а затем попросил меня показать им нашу новую диффузионную систему (Рис. 2).

К.А. Валиев проявил большой интерес к перспективам развития микромощных ИС и к СВЧ-тематике на основе сверхтонких планарных структур. Моё объяснение его заинтересовало и он предложил мне

подумать о переходе в г. Зеленоград.

Успехи, достигнутые в НИИМЭ в 1966-1975 гг., – в процессе разработки сверхбыстродействующих ИС для высокопроизводительных моделей ЕС ЭВМ (“Ряд-2”), систем автоматики, работающих в реальном масштабе времени, – для системы “Эльбрус-2”, а также специализированных систем обработки сверхбольших массивов информации, получаемых с космических объектов, – *действительно очень впечатляли.*

Возникают законные вопросы, как это могло случиться в столь короткие сроки и при наличии изоляции страны, существовали ли какие-то закономерности в процессах управления этими событиями, насколько они были спонтанными, что оригинального было создано отечественными разработчиками? Чтобы ответить на эти вопросы вернёмся в 1964-1965 гг. в НИИ “Пульсар”, а затем в 1966 год в НИИМЭ.

2. СРЕЗ СОБЫТИЙ ПРИ ПРОЧТЕНИИ ФАКТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

«Идти вперёд – значит потерять душевный покой, остаться на месте – значит потерять себя. В самом высоком смысле движение вперёд означает постижение себя» - писал Кьеркегор Серен.

Мой опыт самостоятельной работы был получен в отделе Бориса Владимировича Малина в НИИ «Пульсар»^{1,2,3,4}. Директор института Трутко Анатолий Федорович фактически был инициатором³ и энергичным куратором⁴ постановки новых процессов диффузии в отделе. В статье¹ о становлении и развитии «Пульсара» он подчеркнул: «...в начале 1960-х годов было совершенно очевидно, что мы участвуем в грандиозном глобальном политическом, экономическом и научно-техническом соревновании с западным миром, причём соревновании далеко не мирном и чреватом весьма опасными последствиями. Карибский кризис 1962 года наглядно показал это. Ракетно-ядерный щит СССР без необходимого электронного обеспечения своего исторического сдерживающего назначения не выполнил бы».

¹ Трутко А. Ф. Становление и развитие «ПУЛЬСАРА» // В книге «Очерки истории Российской электроники. Выпуск 1. 60 лет отечественному транзистору» / Под ред. В.М. Пролейко. –М.: Техносфера, 2009. –336 с. +16 с. цв. вкл. ISBN 978-5-94836-219-9).

² Диковский В.И. К вопросу о создании триодной структуры методом двойной диффузии примесей в кремнии из паровой фазы // Вопросы радиоэлектроники, серия II, Полупроводниковые приборы. Выпуск 4, 1962, стр. 9—24). Владлен Диковский показал, что «для получения ширины базовой области ТС порядка 1 мкм (1000 нм) и улучшения их

ВАХ необходимо дальнейшее совершенствование качества обработки Si перед диффузией, а также повышение однородности исходного Si для обеспечения более равномерной диффузии примеси и повышения контроля температуры в процессе диффузии». Этих требований явно было недостаточно.

³ Луканов Н.М. Планарная технология // –М.: ВИНТИ. Итоги науки и техники. Электроника и ее применение. 1965, стр. 74—94). В этой работе отмечалась только принципиальная возможность перехода на новые процессы диффузии с применением газообразных и жидких источников диффузанта. Необходимы были комплексные исследования ряда проблем, которыми и предстояло заняться людям из лаб. №23, решившимися ходить по лезвию бритвы с новыми опасными источниками диффузанта. Даже, если они неожиданно и взрывались.

⁴ Луканов Н.М. Разработка новой технологии для первых отечественных функциональных твёрдотельных схем ИС100 в ФГУП НПП «Пульсар» // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. –М.:–ФГУП «ВИМИ». –2012. Статья передана в печать и не опубликована. В электронном виде имеется в отделе интегральных микросхем (ОИМ) НПК ТЦ МИЭТ.



Рис. 2. Луканова Анна Михайловна – первый оператор диффузионных процессов с применением PCl_3 в отделе Малина Б.В. В 1965 г. она вместе с Малиным перешла работать в КБПМ. Туда же была перемещена и эта установка диффузии.

В январе 1964г. в «Пульсаре» в лаборатории Пресса Ф.П. нам удалось быстро поставить новый процесс диффузии фосфора, используя сверхчистый PCl_3 (рис. 2) для изготовления микромощных

ТС и первых отечественных твёрдотельных микросхем ИС100. Луканова Анна Михайловна стала первым оператором новых диффузионных процессов с применением PCl_3 в отделе Малина Б.В.

Интерес для истории микроэлектроники представляет сохранившийся черновик письма, адресованного зам. министра МЭП тов. Мартюшову К.И., подготовленный Н. Лукановым по указанию Б.В. Малина.

Копия этого письма, подправленная рукой Б.В. Малина, адресовалась и гл. инженеру 2-ого Главного управления МЭП тов. Петрову Л.А. В этом письме речь идёт о ходе выполнения темы ОКР «Прокат» по изделию ИС100. Из текста письма следует, что уже: *«В январе 1964 г. от п/я 2017 (Зеленоградский институт Материаловедения) были получены образцы сверхчистого PCl_3 , использование которого дало наилучшие результаты по диффузии коллекторных и эмиттерных слоёв».*

Это был первый, естественно, не гласный период “соревнования” с США по модернизации технологии изготовления их серии ИС SN-51 фирмы Texas Instruments. Звучит, конечно, очень самоуверенно. Но тогда в отделе Б.В. Малина (в лаборатории А.С. Добкина) диффузия Р по зарубежной технологии с применением зарубежного источника из сплава $(CaO)_x(P_2O_5)_y$ приводила к очень большим проблемам при изготовлении коллекторных и эмиттерных областей изделия ИС100. И эти проблемы удалось решить при использовании уже отечественной технологии с применением PCl_3 . Автор статьи принимал активное участие в разработке и во внедрении этих процессов.

Автоматизация процессов диффузии В и Р в НИИМЭ

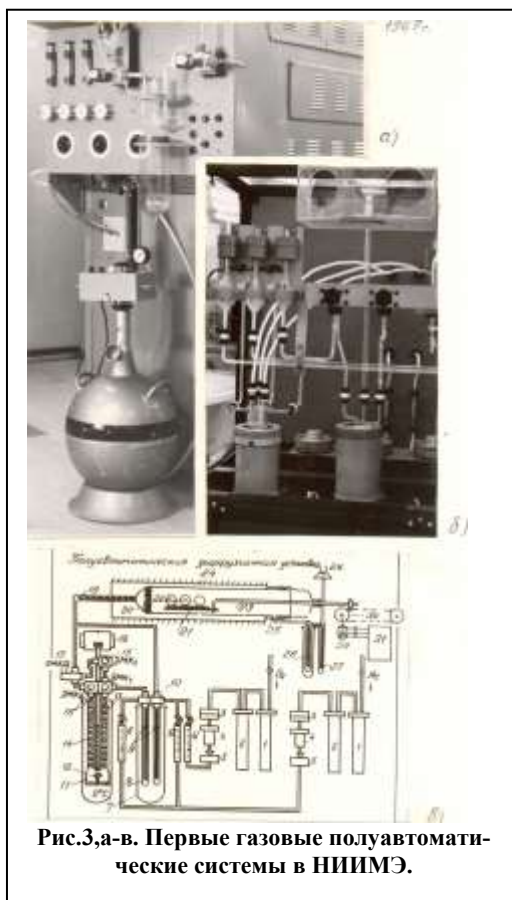
Новая лаборатория №23 “перспективных диффузионных процессов и СВЧ транзисторных структур” начала функционировать в НИИМЭ с 6 января 1966 г. в отделе Анатолия Милова, входящего в сектор №2 Юрия Николаевича Дьякова [1]. Уже в 1966 году появился реальный шанс на равных участвовать в соревновании с США по автоматизации диффузионных процессов (рис. 3, а-в) и, особенно, по созданию ультратонких ТС (УТС) [2]. А затем тонких и надёжных сверхтонких ТС [3], а также групповых процессов диффузии [4], новых «эпипланарных» конструкций ТС [5], сверхбыстродействующих ИС «Искра» на мелких диффузионных слоях [6]. Но это осознание пришло много позже, после детального ознакомления с результатами зарубежных исследований по новым процессам диффузии Р и В^{5,6,7}.

⁵J.C.C. Tsai. Shallow phosphorus diffusion profiles in silicon // Proceedings of the IEEE. Sept. 1969, v. 57, №9, p. 1499-1506).

⁶P.C. Parekh., D.R. Goldstein. The influence of reaction kinetics BBr_3 and O_2 on the uniformity of base diffusion // Proceedings of the IEEE.1969, p. 1507-1512).

⁷«Schmidt Builds Transistors with One-Micron Emitter Width; Achieves New High in Frequency Capability» // IEEE, 1966, v. 14, №10, p. 74—77).

Работа по автоматизации и созданию УТС в лаборатории №23 сразу вышла на первый план. Этому способствовал ряд причин. Во-первых, не было известно, кто делал такие попытки. Во-вторых, запретный плод был слишком сладок, а висел он так близко. В-третьих, о возможных проблемах как-то не думалось, – да ещё и не было опыта горьких неудач. В-четвертых, подстегивал удачный опыт, полученный в НИИ «Пульсар». И, наконец, в экспериментальном плане у меня была почти полная свобода выбора направления поиска и очень большие возможности. Однако, следовало ожидать, что проблемы будут и будут не только у практиков, но и у теоретиков.



Оценки теоретиков показывали, что УТС с шириной активной области базы 30-50 нм сделать нельзя, то есть в перспективе сделать можно, но они никому не будут нужны, так как будут иметь напряжение прокола Ирли менее 1В. Расчёты основывались на классических представлениях о распределениях концентрации легирующих примесей, образующих физическую структуру (ФС) транзистора, и аппроксимируемых известными функциями «exp» или «erfc», при этом в ряде случаев, с привлечением не реально высоких значений «эффективной» концентрации примеси на поверхности. Эти функции давали малые значения градиентов концентрации примесей в переходах. *Надо было в корне менять сам подход к формированию ФС УТС.*

В рамках НИР «Ингредиент» [2] в НИИМЭ «Луканов по своей инициативе захотел сделать ультратонкие ТС. Блажен, кто верует! В свое время Владлен Диковский, видимо, и распалил воображение автора резко перейти рубеж (в 1000—1500 нм)» [1]. Для формирования УТС были использованы усовершенствованные методы проведения процессов диффузии В с применением плоскопараллельного твёрдого источника примеси – V_2O_3 в полностью герметичном (с помощью тонкого слоя V_2O_3) разборном боксе из листовой Pt (рис.4). Диффузия В в герметичном боксе давала воспроизводимые результаты по поверхностному сопротивлению ρ_s , очень малый (2-3%) разброс по этому параметру на пластинах и малые токи утечки переходов при устранении дефектов (видны на вставке в виде треугольников при высоком парциальном давлении реагента и низком давлении кислорода). Фактически этот процесс обеспечивал эталонную базу при правильном выборе ФС.



Технические требования (ТТ) на внутреннюю разработку силами отдела №2 универсальной полуавтоматической диффузионной системы были подписаны директором 02.02.1966 г. Первая НИР «Ингредиент» [2] была утверждена Главным инженером НПО «Научный Центр» И. Ефимовым 30 июня 1966 г. Она проводилась по Приказу МЭП СССР от 27.06.1966 г. Основная цель работы: «Разработка режимов получения воспроизводимых тонких диффузионных слоев с низкой концентрацией примеси». Фактически требовалось подтвердить возможность изготовления малощумящих полевых ТС с затвором на основе р-п переходов (JFET). В этой комплексной работе впервые в отрасли в 1967 году разработали, детально исследовали и применили на практике полуавтоматизированные системы диффузии В и Р (рис. 3, а-в) из WBr_3 и PCl_3 с высокоточным (для того времени) поддержанием концентрации паров легирующих примесей и парциальных давлений газов. Эффективное термостатирование источника диффузанта и входящих газов, а также их однородное перемешивание достигалось в специальных «дефлегматорных» колонках с высокоточным поддержанием уровня диффузанта и с большой поверхностью принудительного охлаждения. Кварцевые колонки, имеющие большое количество углублений по всей поверхности, помещались в вакуумированные глубокие сосуды Дьюара. Для охлаждения использовались лед с водой, сухой лед (твёрдый диоксид углерода) и ацетон, сухой лед и CCl_4 . Реле времени и автоматические клапаны

собственного изготовления обеспечивали проведение кратковременных процессов диффузии по заданной программе. Детальное исследование особенностей проведения процессов диффузии В и Р на этих системах были изложены нами в ряде работ. В качестве газа носителя впервые в отрасли был использован газообразный азот, полученный испарением его из жидкой фазы в сосуде Дьюара. Здесь отличился Игорь Канорушкин – очень интеллигентный и вдумчивый инженер (см. НИР «Ингредиент-2», НИИМЭ).

Во второй половине 1966 г. (время оттепели) из Великобритании в НИИМЭ поступили диффузионные печи «Vacwell» для процессов диффузии с использованием жидких источников, оснащённые газовыми стеклянными системами с ручными запорными вентилями с применением силиконовой смазки для герметизации (рис. 5 – копия системы, сделанная конструкторами Дьякова Ю.Н. в отделе №2).

Первыми инженерами, освоившими процессы диффузии на этих системах, были наши соседи по территории гермозоны: Алла Викторовна Малых из отдела Евгения Дробышева, В.А. Фарбинович, Лукьянова Галина, Данилин Юрий, Олег Крамаренко и тогда молодой, но подающий большие надежды, инженер Евгений Сергеевич Горнев.



Рис. 5. Газовая система зарубежной печи типа «Vacwell».

Для нашей лаборатории, занимающейся разработкой УТС и сверхтонких ТС и оснащённой нашими полуавтоматическими системами дозировки газов и реагентов, они не представляли уже интереса, да и не достались бы нам, так как решали важные вопросы по

поставке кристаллов ИС из других подразделений.

При интенсивной работе не обходилось и без курьёзных потерь. Заключительным аккордом в разработке наших систем дозирования диффузантов – PCl_3 и VBr_3 стал фторопластовый импульсный дозатор с диафрагменным резервуаром (рис. 6), который должен был обеспечивать импульсное впрыскивание разовых порций реагента [2, стр. 210].

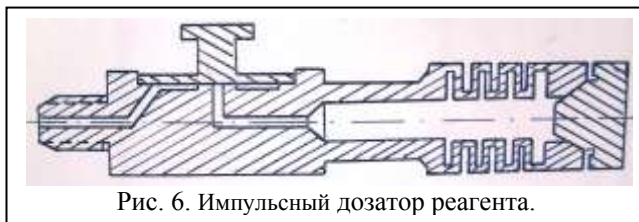
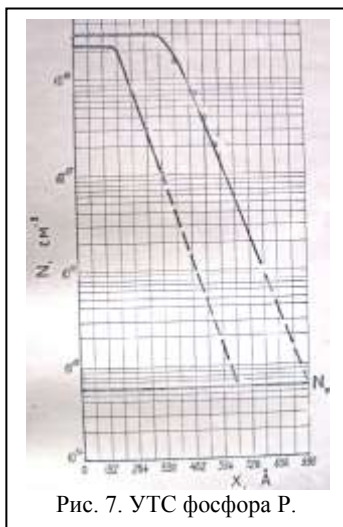


Рис. 6. Импульсный дозатор реагента.

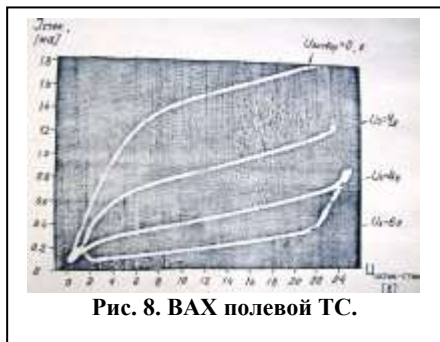
Наш дозатор имел запорный ручной клапан для надёжной отсечки от атмосферы. Через некоторое время этот дозатор привлёк внимание конструкторов из отдела №2. Они подали заявку на изобретение и срочно сделали его живое воплощение. Вскоре их постигло страшное разочарование. Пары VBr_3 ночью выходили через микрощели и взаимодействовали с атмосферной влагой. Инженеры нашли временное решение и заключили дозатор в резиновый гибкий колпачок. Но реагент быстро разрушал резиновый чехол, превращая его в жёлтую труху. Два-три-четыре слоя тонкой резины не спасали. Запасы резинок таяли на глазах, а зеленоградские аптеки отказывались продавать их оптом. Главный инженер НИИТМ Г.И. Блинов, посетив участок и узнав о случившемся, так посетовал на чудо прибор: – “Хорошо иметь собственный длинный «аппарат», но не обязательно всем его показывать”. Ошиблись конструктора, не доработали, не хватило времени, – к сожалению, и такое тоже встречалось в работе.

Зато у нас получилась удачная разработка по диффузии фосфора с низкой поверхностной концентрацией (рис. 7). Впервые использовался новый порошкообразный источник диффузанта – нитрид фосфора (PN). Диффузия проводилась в полугерметичном кварцевом боксе. Разработку сверхчистого реагента провёл сотрудник НИИМВ Минаев Виктор Семенович – будущий известный профессор.



Процесс предназначался для формирования высокоомной тонкой области канала п-типа проводимости для полевых ТС с затвором на основе обратного смещённого п-р перехода (JFET).

Для полевых ТС с каналом р-типа проводимости был использован процесс диффузии бора из жидкого источника диффузанта BBr_3 в условиях строгого поддержания всех параметров процесса. На рис. 8 даны ВАХ полевого транзистора с каналом р-типа проводимости. Напряжение отсечки у первых образцов таких ТС составило около 6В. В ТЗ на НИР этот параметр не оговаривался. Его величина определялась интегральной концентрацией примеси в канале и могла варьироваться в широких пределах. Главной задачей было получение малых токов утечки при обеспечении высокой воспроизводимости параметров процесса диффузии.



Научный подход начинается с измерений

На первом этапе важные задачи были связаны с длительными и систематическими исследованиями влияния режимов процессов на параметры мелких (М), тонких (Т), сверхтонких (С) и ультратонких (У) слоёв, их устойчивость к колебаниям процессов и их воспроизводимость.

Трудоёмкими оказались исследования по достоверной оценке распределений концентрации $N(x)$ легирующих примесей, образующих ФС транзистора, – собственно, его сердце, кровеносную систему и легкие. В этой работе отличилась Лариса Медведева. Обладая весёлым и неунывающим характером, очень подвижная, – она демонстрировала чудеса терпения при снятии огромного количества экспериментальных точек и построении профилей легирования на миллиметровой бумаге в большом масштабе. Опыт свой она передала оператору Надежде Грачевой. Работа пошла быстрее и качественнее после того, как конструкторский отдел Ю.Н. Дьякова изготовил нам установку (рис. 9) для автоматизированного проведения процессов анодного окисления диффузионных слоёв в этиленгликоле с $0,04N KNO_3$.

При построении профилей легирования с минимально допустимой погрешностью по дифференциальной проводимости впервые удалось подойти к этой задаче, как к математически не корректному объекту, введя аппроксимацию экспериментально полученных распределений приращений поверхностного сопротивления $\Delta\rho_s$ с помощью гладких кривых.

Практически такой же подход к построению тонких профилей был детально описан позднее в зарубежной статье⁵.



Рис. 9. Установка анодного окисления.

На рис. 10 даны графики изменения ρ_s по глубине для различных по толщине эмиттерных слоёв (1-4) для «С»-профилей ТС. Более наглядными и информационно насыщенными (рис. 11) оказались графики, дающие изменения среднего значения проводимости $\sigma_{сл}$ этих слоёв.

На рис. 12 даны распределения концентрации В и Р по глубине в активных (1-4) эмиттерных, пассивных базовых (6) и активных базовых областях (11-14) для различных режимов отжига.

Профили 7-10 соответствовали диффузии Р в образцах, не имеющих диффузионных областей базы.

Профиль 4 достигался при дополнительном воздействии температуры 1000^0 С.

Профиль (5) соответствовал активной базе до диффузии Р.

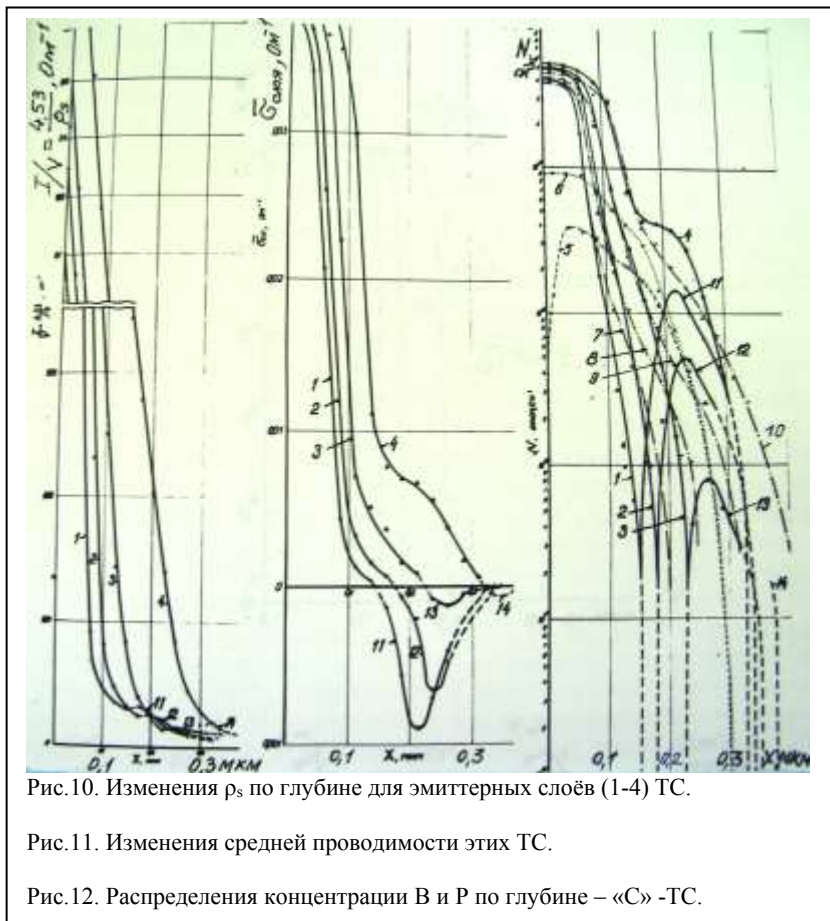


Рис.10. Изменения ρ_s по глубине для эмиттерных слоёв (1-4) ТС.

Рис.11. Изменения средней проводимости этих ТС.

Рис.12. Распределения концентрации В и Р по глубине – «С» -ТС.

На рис. 13 даны распределения концентрации В при различных режимах диффузии В. На рис. 14 – концентрации Р при различных режимах диффузии Р. Профиль 1 отличается резким спадом концентрации. Профиль 2 имеет плавный спад концентрации Р.

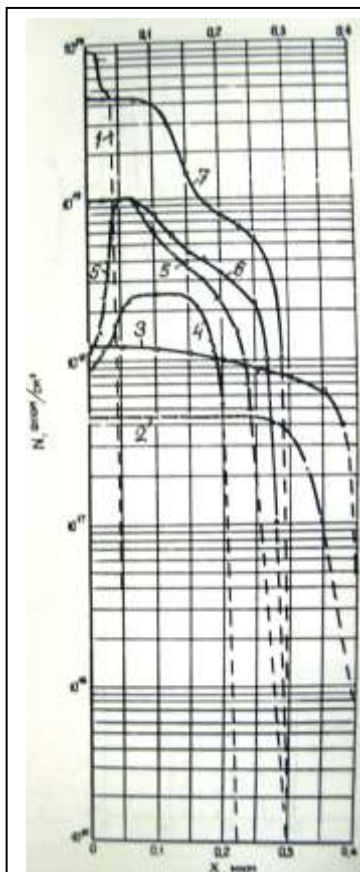


Рис. 13. Семейство профилей В.
 $T=850-1150^{\circ}\text{C}$, $t=3-5$ мин,
 среда: $\text{Ar}+\text{O}_2$. $\rho_s=600, 1000,$
 $1000, 500, 250, 700, 280$ Ом/кв.

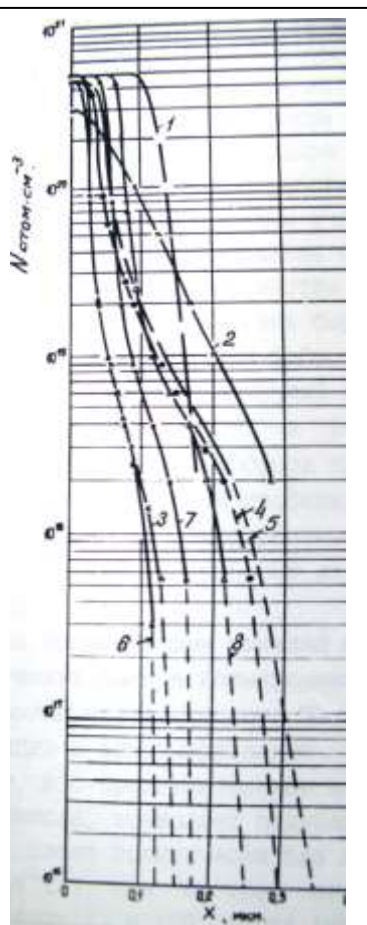


Рис. 14. Семейство профилей Р.
 $T=900-950^{\circ}\text{C}$. Профили №1, 2 –
 при 950°C .

Измерение ρ_s 4-х зондовым методом вносило свои известные проблемы. Для их устранения значения ρ_s для ультратонких слоев стали оценивать по результатам измерения напряжения и тока $\{R=\rho_s(L/W)=V/I\}$ на специально подготовленных структурах. Последние имели прямоугольную форму с определённым отношением длины L образца к его ширине W и заранее сформированные сильно

легированные омические контактные области. Контактные и боковые поверхности образца маскировались до начала исследований.

Тонкие профили бора (рис. 15) имели специфические участки в распределении и явно указывали на существенное наличие В в неактивной форме.

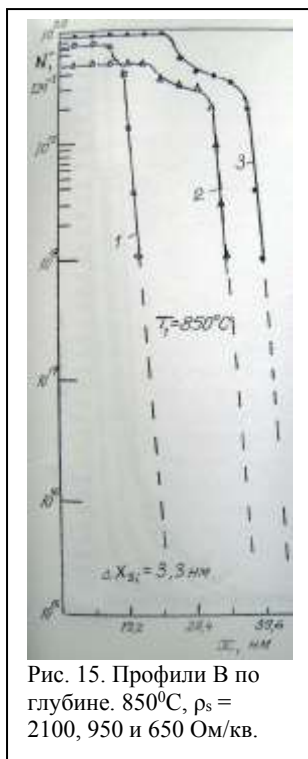


Рис. 15. Профили В по глубине. 850°C , $\rho_s = 2100, 950$ и 650 Ом/кв .

Удаление одного диффузионного слоя толщиной Δx проводилось путем окисления кремния в кипящей деионизованной воде с последующим травлением окисла в разбавленной плавиковой кислоте. Толщина удаляемого слоя кремния Δx составляла порядка (30-33)Å. Эта величина оценивалась на зарубежной установке «Interfaco» на специальном образце, прошедшем многократные циклы окисления – травления. Всем инженерам в обязательном порядке приходилось самим исследовать свою ФС. Кроме того, каждый сотрудник обязан был

знать, какие ФС исследуют его коллеги. Обмен информацией в лаборатории был поставлен оперативно и был очень полезен.

Молодые инженеры Беркова Надежда, Сладкова Валентина, Маркова Вера, Небольсин Михаил, Кокин Вильям, Фокина Светлана, Карабанов Владимир, Грабчак Володя, – быстро осваивали технику. Они были серьёзными, целеустремлёнными и очень исполнительными. Одновременно, внимательные к другим, – они были симпатичными и располагающими к себе молодыми людьми. Показывая свое усердие и изобретательность в работе, естественно, проявляли свои неповторимые личные качества в обычной обстановке. И, по-своему, реагировали на происходящее. Все они внесли достойный вклад в детальное исследование профилей диффузии В и Р, а также ультратонких профилей бора (рис. 15), варьируя определённые параметры при различных парциальных давлениях паров диффузанта, Ag и O₂.

Здесь проявили себя и наши операторы, – будущие специалисты: Лебедев Валера, Галина Лыженкова, Павел Жуков, Анастасьев Валентин, Паня Цветкова, Шматова Татьяна, Кукушкина Мария, а также наладчики оборудования Игорь Базаров, Сергей Левицкий, Левчук В.В. Мастером на все руки и отличным оператором был Игорь Базаров. В этот плодотворный период коллективу удалось провести очень большой комплекс исследований по созданию ТС и заложить основы для дальнейших работ с тонкими скрытыми слоями на основе As, ТС с селективной эпитаксией и высокопроизводительными процессами диффузии В, Р, Au и As.

Душой коллектива стала Зинаида Бойкова, безудержно хлопотавшая о своевременном обеспечении лаборатории всем необходимым. Делопроизводство вела Дьякова Галина. Мы умели не только дружно работать, но и весело отдыхать. Процессы фотолитографии нам проводили Зинаида Хорина и Т. Есина из лаборатории Лубашевской Авроры Васильевны, а эпитаксиальные процессы делал Геннадий Шварц из лаборатории Евгения Сергеевича Любимова. Юрий Реформатский сам изготовил уникальный комплект фотошаблонов с шириной контактных окон 0,6 мкм. Процессы ионного легирования проводили Ирина Белякова и Андрей Камнев. Нам удалось показать, что на тот период времени диффузионные сверхтонкие ТС имели существенно лучшие характеристики, чем ионнолегированные. Это было связано со значительно меньшим количеством вносимых структурных дефектов. Это превосходство долго сохранялось для «С»-ТС.

Известие о создании в США СВЧ транзистора⁷ было интересным, но не было знаковым, – оно только подтверждало тот факт, что выбранная нами тропа – правильная. В это время мы уже исследовали

ультратонкие ТС с нанометровыми глубинами диффузионных слоёв.

Новый подход к разработке УТС для СВЧ ИС

Освоив управляемые процессы диффузии, и научившись целенаправленно варьировать характеристические параметры ФС, мы приблизились к решению проблем получения предельно тонких ТС – УТС с «крутыми» профилями легирования, с максимально допустимыми уровнями легирования и минимально допустимой дефектностью. В качестве прототипов могли выступить сплавные транзисторы с резкими градиентами, но переложенные на новые диффузионные процессы. Тонкий профиль фосфора №1 (рис. 14) с резким спадом $N_3(x)$ был получен при относительно высокой 950°C температуре отжига. Он ближе всего подходил на роль “идеального” эмиттера. Но его надо было существенно приблизить к поверхности. Работа с «меза»-структурами – сплошными базовыми и эмиттерными слоями, химически отравленными в виде столбиков различного диаметра – давала очень большую и полезную информацию. Характер выявленных зависимостей токов утечки переходов эмиттер-коллектор и их пробивных напряжений, а также коэффициентов усиления при различных уровнях светового облучения, тип и плотность выявленных при травлении дефектов, – позволяли быстро вносить коррекцию в процессы и оценивать эффективность конкретной ФС. Сам переход на ультратонкие слои уже давал первый полезный эффект – градиент $N_3(x)$ заметно увеличивался. Повышение уровня легирования играло в том же направлении, но сильно легировать базовую и эмиттерную области было нельзя, – тут же появлялись повышенные токи утечки, связанные, в том числе, и с туннельной составляющей паразитного тока базы. Увеличение интегральной концентрации Р приводило к генерации структурных дефектов, – как следствие, к пластической деформации и к генерации локальных дислокаций, преципитатов, групповых дефектов, областей с высоким уровнем внутреннего напряжения решетки Si, – затем и к образованию облака Катрелла из быстро диффундирующих примесей (Cu, Au, Fe, Ni). Последние создавали локальные участки с высокой напряжённостью электрического поля и проявляли себя в виде повышенных токов утечки переходов или даже короткого замыкания переходов. Переход на пластины Si с химико-динамической полировкой многих проблем не решал.

Работоспособность первых УТС проверялась на W зондах без металлизации. При демонстрации их К.А. Валиеву [2, 1] вечером сказалося “визит эффект”, – автомат не сработал, – и пришлось концы проводов держать директору НИИМЭ и нач. лаборатории.

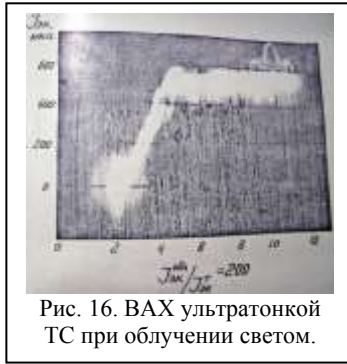


Рис. 16. ВАХ ультратонкой ТС при облучении светом.

Мега-ультратонкие ТС сильно реагировали на свет (рис. 16) и показывали напряжение прокола не менее 7В. Если меня в 1975 г. ругали за сверхтонкие ТС, – то за ультратонкие, – директор К.А. Валиев тогда в 1967 г. искренне поздравил. На рис. 17 приведены из отчёта [2] распределения концентрации ионизированных атомов В и Р, образующих ультратонкую ТС или, по современной терминологии, нано-ТС по вертикали. Как видно из рис. 17, эта УТС имеет очень крутые профили легирования В и Р. Она отличается тем, что при быстрой диффузии Р в особых условиях наблюдается перераспределение В (профили В'-В) непосредственно под эмиттером («dip» – эффект ступеньки) на малую величину $\approx 145\text{\AA}$. Глубина эмиттерного перехода составила $\approx 317\text{\AA}$, глубина перехода коллектор-база $\approx 818\text{\AA}$. При этом ширина активной области базы $w_{аб} \approx 501\text{\AA}$. Превосходные («алиг») профили на рис. 17 имели всего лишь сотни ангстрем. Это дало основание позднее назвать такие УТС «алигатомными», – т. е. превосходящими сотню ангстрем. Формирование УТС с $w_{аб} = (30 - 50)$ нм представляло исключительно сложную проблему и требовало применения принципиально новых подходов и новых конструктивных решений. Очень серьёзная проблема была связана с формированием непроникающих и низкоомных контактов к таким слоям. Использование чистого Al даже без его вжигания не решало проблему.

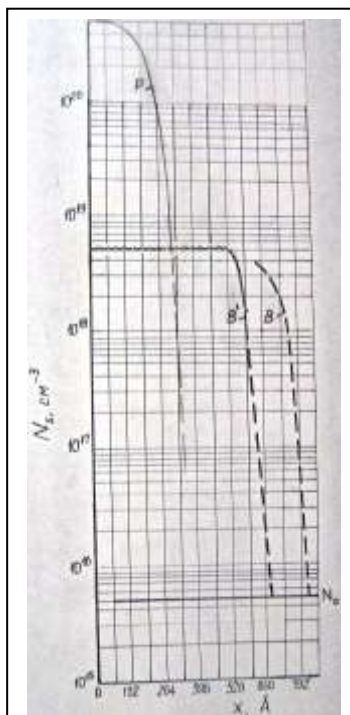


Рис. 17. Профили легирования В и Р в УТС

Наличие переходного слоя на поверхности приводило к значительному увеличению сопротивления эмиттера и не позволяло получать воспроизводимые контакты. Применение системы Mo-Al только частично снимало проблему. Требовался совершенно новый подход к решению задачи по созданию сильнолегированных и непроникающих контактов. И решение было найдено при применении тонкого низкоомного слоя поликристаллического кремния (поликремния-Si*), легированного фосфором в процессе его осаждения Si*(P). И, наконец, был достигнут серьезный успех, – мне удалось найти новый подход к решению проблем формирования УТС [2, стр. 121].

“Формирование эмиттерного слоя производится сразу после проведения диффузии бора в одностадийном процессе. При этом во время проведения диффузии бора поддерживаются контролируемые

условия диффузионного процесса, которые обеспечивают внедрение бора с заданной интегральной концентрацией. ... Режимы диффузионного процесса, отмеченные выше, должны обеспечить формирование диффузионного слоя с резким распределением примеси, малой глубиной и высокой поверхностной концентрацией”, стр. 122 – “При этом происходит одновременное перераспределение легирующих примесей с поддержанием сверхтонкой, не скомпенсированной активной базовой области между практически параллельными резкими диффузионными фронтами обеих примесей.”

За рубежом реализация ультратонкой области базы *в одностадийном процессе диффузии* бора была достигнута только в 1992 г. при использовании в качестве источника примеси диборана⁸.

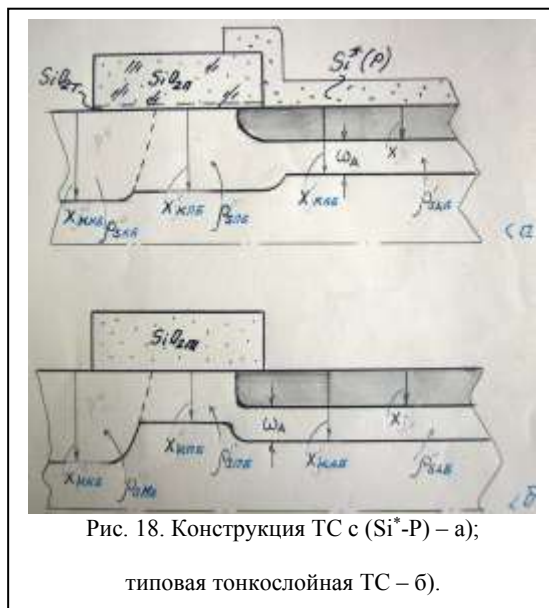
⁸Y. Kiyota et al. Ultra-thin-base Si bipolar transistors using rapid vapor-phase direct doping (RVD) // IEEE Transactions on electron devices. vol. 39, №9, Sept. 1992, p. 2077-2080).

Первые ТС с пассивными областями эмиттера на основе поликремния и точно локализованными составными областями низкоомной пассивной и высокоомной активной базы

В 1968 г., – на четыре года раньше японской технологии “Dopos”, – нами была предложена новая конструкция и получены первые образцы тонкослойных ТС с пассивными эмиттерными областями на основе поликристаллического кремния ($\text{Si}^*\text{-P}$), легированного P в процессе эпитаксиального осаждения. Пассивная область эмиттера являлась источником примеси и непроникающим низкоомным омическим контактом. Применение P (взамен As) давало несколько дополнительных преимуществ при формировании УТС. Более высокий уровень ионизированной примеси в эмиттерном слое обеспечивал получение больших значений коэффициента усиления по току. Возможность более гибкого управления процессом в отсутствие кислорода при эпитаксиальном осаждении $\text{Si}^*\text{-P}$ давало дополнительную степень свободы в регулировании приповерхностной фазы на границе ($\text{Si}^*\text{-P}$) - Si. Однако, наличие исходного тонкого матричного окисла на границе, создавало свои новые и, как оказалось позднее, большие проблемы, решение которых откладывалось, так как возникали неотложные задачи по плановым и срочным работам. Использование P, отличающегося большим коэффициентом диффузии по сравнению с As, потребовало решения новой задачи по обеспечению воспроизводимых более кратковременных и высокотемпературных процессов отжига. Первые процессы осаждения $\text{Si}^*\text{-P}$ осуществлялись в малоинерционном эпитаксиальном реакторе с предварительным отжигом в атмосфере водорода в отделе очень способного Евгения Сергеевича Любимова.

На рис. 18а дана усложненная конструкция ТС не только с

пассивным эмиттером на основе ($\text{Si}^*\text{-P}$), но и с маскирующим окислом на основе пиролитического диоксида кремния $\text{SiO}_{2\text{П}}$ и с сильнолегированной пассивной областью базы (рспб), смыкающейся по всему периметру с активной областью эмиттера и высокоомной активной областью базы. Первый вариант такой ТС с углубленной пассивной областью базы (хкпб) получили при химическом вытравливании тонкого базового слоя из эмиттерных окон до разгонки бора. Но этот первый вариант оказался мало воспроизводимым.




Отработкой процессов диффузии для этих ТС стал заниматься инженер-оператор Валера Лебедев. Успешно сочетая работу с учёбой в МИЭТ, Валерий Васильевич настойчиво продвигался к цели.

Второй, – более удачный вариант, – был основан на частичном и воспроизводимом удалении бора из эмиттерных окон в процессе быстрого высокотемпературного окисления в сухом кислороде, используя малоинерционную установку с ИК нагревом и равномерным движением пластин на специальном лотке с наклонными дырочками [20-21].

На рис. 18б для сравнения дана тонкослойная ТС с маскирующим окислом на основе термического SiO_2 . Этим типом тонких ТС («Г» – профиль) стал заниматься Вильям Николаевич Кокин.

На рис. 19 дан Акт о приоритете разработки УТС с эмиттером на основе поликремния, легированного P ($\text{Si}^*\text{-P}$).

"УТВЕРЖДАЮ"


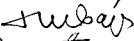
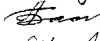


 Руководитель предприятия
 п/я В-2892
 А. НАЗАРЬЯН
 1979г.

А К Т №1

об использовании результатов разработки, проведенных к.т.н. Лукановым Н.М. по теме его докторской диссертация.

Мы, нижеподписавшиеся, представители предприятия п/я В-2892, нач. отдела – Любимов Е.С., нач. лаб. – Шварц К.-Г.М., вед. инженер – Басов А.С., ст. инженер – Манжа Н.М. настоящим актом подтверждаем, что сотрудником предприятия п/я В-2892 Лукановым Н.М. в 1968 году была разработана новая конструкция интегральных тонкослойных транзисторных структур с легированной поликристаллической несвязной областью эмиттера, являющейся источником примеси при последующем формировании активной эмиттерной области и непроницающим низкоомным омическим контактом к этой области. Аналогичная конструкция была описана за рубежом в 1972 году (*J. Jap. Soc. Appl. Phys. (Suppl)*, 1972, v.42, p.101) и известна под названием "допос" – конструкция.

Сотрудниками отдела 34 п/я В-2892 Басовым А.С. и Манжа Н.М. под руководством к.т.н. нач. отдела Любимова Е.С. была разработана технология изготовления структурно-полупроводниковым эмиттером, которая в настоящее время внедряется на предприятии п/я М-5076 на изделия ОЗУ ЭСЛ-типа емкостью 4кбит.

Нач. отдела		Е. Любимов
Нач. лаб.		К. Шварц
Вед. инженер		А. Басов
Ст. инженер		Н. Манжа

**Рис.19. Акт о приоритете разработки УТС с эмиттером
на основе поликремния, легированного P ($\text{Si}^*\text{-P}$).**

За рубежом интерес к УТС с применением поликремния, легированного фосфором, возник позднее⁹ при разработке СВЧ структур.

⁹M. Nanba, T. Uchino, N. Kondo and at all. A 64-GHz f_T and 3.6-V BVCEO Si bipolar transistors using in situ phosphorus-doped and large-grained polysilicon emitter contacts // IEEE Transactions on electron devices. vol.40, №8, August 1993, p. 1563-1565). (см. доклад на конференции в IEDM Tech. Dig. в 1991, – P. 443-446).

В этом месте сделаем отступление и вернёмся назад во времени.

Мировой интерес к УТС с пассивной областью эмиттера на основе $Si^*(P)$ снова возник, когда были внедрены методы самосовмещения и самоформирования. В 1988 г. в Всесоюзном конкурсном проекте Н.М. Луканова по микроэлектронике (для создания ультрабыстродействующих ИС) пришлось вернуться к ультратонким ТС, которые получили название, – “алигатомные ТС”-структуры с размерами в сотни Å. В 1991 г. по материалам конкурсных проектов С.А. Горяиновым в США был представлен комплекс работ от ППИ НПО “НЦ”. Наши вертикально изолированные полностью самосовмещённые УТС (VIFSAT) имели точно локализованные пассивные селективные области базы и эмиттера (Si^*-P), а также селективные области металлизации на основе W.

При расчёте этих УТС с Наталией Николаевной Лукановой впервые были введены экспоненциальные функции с высокими показателями (n): $N(x)=N_0(x) \exp\{x/L\}^n$ ¹⁰. Пределом для семейства этих кривых была функция косинуса. Последняя в первой её положительной полуолне очень хорошо совпадала с резким профилем легирования Р. Это наводило на мысль, что идеальный профиль легирующей примеси – это резкий профиль, – «похожий на функцию $NoCos(x/L)$ в первой её четверти: $N(x) = N_0(x) \cos\{x/L\}$, где $L=(Dt)^{1/2}$.

¹⁰Луканова Н.Н., Луканов Н.М. Конструктивно топологическое проектирование самосовмещающихся субмикронных сверхтонкослойных транзисторных структур с улучшенными параметрами // Сборник научных трудов. Физика, технология и схемотехника. Под редакцией Ю.А. Парменова. -М.: -МИЭТ. -1989. -стр. 80-93).

Через два года в зарубежной публикации был использован такой же подход.¹¹

¹¹K. Suzuki. Optimum base doping profile for minimum base transit time // IEEE Transactions on electron devices. vol. 38, №9, Sept. 1991, p. 2128-2133).

Быстрые и высокотемпературные отжиги в НИИМЭ сверхтонких и ультратонких диффузионных слоев

Как всегда, в науке, при возникновении острых проблем для их решения требовались новые подходы, и они, как правило, находились

при интенсивном поиске, даже ценой ошибок! Быстрый окончательный отжиг сверхтонких и особенно ультратонких ТС при предельно высокой температуре был очень соблазнительным решением, но и таил в себе массу проблем. Первые положительные эксперименты с ручным быстрым введением пластины Si в зону реакции, с кратковременной (секунды) выдержкой в зоне и с быстрой ручной выгрузкой из зоны, – казались многообещающими, но часто приводили к смыканию р-р переходов. В 1969 г. к разработке специализированной малоинерционной установки с быстрым нагревом пластин галогенными лампами был привлечен НИИТМ. Огромная установка, под стать большому росту ведущего разработчика – Баранова В.Н., вскоре стояла на полу лаборатории №23 и вызывала чувство трепета. Начались поиски, посыпались неудачи, но и стало приходить понимание сущности происходящих физических процессов [20, 21]. Зато следующая малоинерционная установка с ламповым отжигом впечатляла. Она имела кварцевый лоток с большим количеством дырочек под углом к плоской поверхности, по которой скользили (левитируют) на газовой подушке с заданной скоростью пластины Si. В 1974 году эта чудо печь была передана с согласия нач. отдела НИИТМ Вадима Ивановича Иванова в цех №4 завода «Микрон» для формирования по тематике «Эльбрус-2» ИС серий 100, 500, 700 на сверхтонких слоях и оценки перспектив её применения. Однако, в 1976 году она была демонтирована, так как требовала большого к себе внимания и дорогих кварцевых лотков, – работа в будущем с ультратонкими слоями для цеха не была даже голубой мечтой. Им с лихвой хватило и “С”-слоёв.

Разработка новых «эпипланарных» ТС в НИИМЭ

В 1970 г. в ОКР «Процесс-2, ч. 1» [4] была впервые реализована так называемая “эпипланарная” – конструкция ТС с областями боковой диэлектрической изоляции (БДИ) на основе пиролитического диоксида кремния. Авторское свидетельство (А.с.) №439863 (в соавторстве со К.-Г.М. Шварцем, А.А. Щербининым, В.В. Лебедевым и Е.Н. Любушкиным) было получено с приоритетом от 13 июля 1970 г. и было оно раньше изобретения США по изопланарной изоляции структур термическим диоксидом кремния. В соответствии с А.с. (рис. 20а) предмет изобретения звучал так: “Способ изготовления активных элементов интегральных схем по планарно-эпитаксиальному процессу, отличающийся тем, что, с целью повышения коэффициента интеграции и улучшения качества изоляции компонентов схемы, диффузионные слои формируют в эпитаксиальных островках кремния, которые

выращивают селективно в окнах, вытравленных в диэлектрическом слое, нанесенном на поверхность подложки из монокристаллического кремния, причем эпитаксиальные островки выращивают до уровня диэлектрического слоя”.

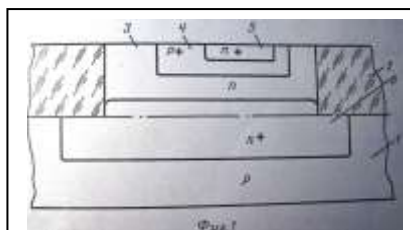


Рис. 20а. Эпипланарная конструкция ТС в соответствии с А.с №439863.

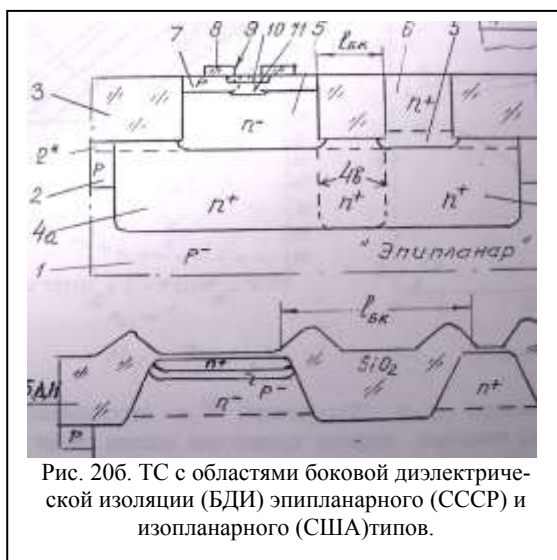


Рис. 206. ТС с областями боковой диэлектрической изоляции (БДИ) эпипланарного (СССР) и изопланарного (США) типов.

Сформированные ТС (рис. 206) имели точную локализацию (самосовмещённые участки) p- – коллекторных (5) областей, p+ – скрытых составных совмещённых слоёв (4,а+4,б), p+ – глубоких коллекторных контактных (6) областей, p – областей (2)

противоинверсионных каналов, p^+ – базовых (7) пассивных, p – базовых (11) активных областей, а также p^+ – эмиттерных (10) областей относительно вертикальных границ областей (3) БДИ.

Акт о приоритете на “эпипланарную” конструкцию ТС с боковой диэлектрической изоляцией дан на Рис. 20в.




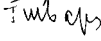
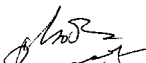


		<p>"УТВЕРЖДАЮ"</p> <p>Руководитель предприятия п/я В-2892 А. НАЗАРЬИН 1977 года</p>
<p>А К Т №2</p> <p>об использовании результатов разработки и исследований, проведенных к.т.н. Лукановым Н.М. по теме его докторской диссертации</p>		
<p>Мы, нижеподписавшиеся, представители предприятия п/я В-2892, нач.отдела – Любимов Е.С., нач.лаб. – Щербинин А.А., нач.лаб. – Шварц К.-Г.М., настоящим актом подтверждаем, что сотрудником предприятия п/я В-2892 Лукановым Н.М. в 1969 году была предложена новая конструкция интегральных сверхбыстродействующих транзисторных структур с боковой диэлектрической изоляцией – “эпипланарные” структуры (отчет п/я В-2892 “Процесс-2”, 1970 г.; Авторское свидетельство №439863 от 19.04.74 г.). При непосредственном участии Луканова Н.М. в исследовании и разработке таких структур соавторами заявки под руководством нач.отд.34 Любимова Е.С. были изготовлены по эпипланарному процессу сверхбыстродействующие ИС на переключателях тока и схема памяти на 256 бит, которая в настоящее время внедряется на предприятии п/я М-5076.</p>		
НАЧ.ОТДЕЛА		Е.ЛЮБИМОВ
НАЧ.ЛАБ.		А.ЩЕРБИНИН
НАЧ.ЛАБ.		К.ШВАРЦ
<p>"СОГЛАСОВАНО"</p>		
СТ.ИНЖЕНЕР		Е.ЛЮБОВСКИЙ
НАЧ.ЛАБ.		В.ЛЮБЧИКОВ
ЗАВ.ОТРАСЛ.ЛАБ.МИИТ		Н.ЛУКАНОВ

Рис. 20в. Акт о приоритете на “эпипланарную” конструкцию ТС с боковой диэлектрической изоляцией.

По принятой теперь терминологии впервые удалось реализовать

самосовмещенные интегрированные по технологии и по конструкции СВЧ биполярные ТС с граничной частотой 4 ГГц при большой ширине эмиттера 6 мкм. Через несколько лет конструкция по А.с. была противопоставлена “изопланарной” конструкции, предложенной в США.

По указанию К.А. Валиева мне пришлось в МЭПе встречаться с Гарри Селло, который приезжал из США в СССР для патентования изопланарной конструкции. Тогда, естественно, рассказывать о нашей эпипланарной конструкции было ещё нельзя. Способы (рис. 20а и 20б) идеально подходили для изоляции тонких, сверхтонких и ультратонких ТС за счёт применения низкотемпературного пиролитического слоя БДИ в сочетании с процессом селективной (избирательной) эпитаксии Si.

Специальный отжиг As проводился в атмосфере водорода. В этом случае, помимо резкого уменьшения паразитных ёмкостей, уменьшалось перераспределение As из скрытого слоя в тонкую эпитаксиальную плёнку, что позволяло резко уменьшить время переноса носителей заряда через коллекторную область. В конструкции ТС, представленной на рис. 20в, можно было удачно совмещать три инновационных решения: – эпипланарную боковую изоляцию со скрытыми составными коллекторными слоями; – сверхтонкие ТС с точно локализованными пассивными и активными областями базы и активного эмиттера; – пассивные эмиттерные области на основе Si*-Р.



Рис. 21. Топология кристалла ВЧ усилителя: ИС –“ЛУК”.

В НИР «Ингредиент-1» [3] были впервые изготовлены ВЧ ИС линейного усилителя каскадного – «ЛУК» (рис. 21) с “С”-профилем легирования и с рабочей частотой 200 МГц. Схемотехнику линейного усилителя разработали Игорь Малышев, Николай Семученков и Александр Голубев. Они провели исследование параметров и расчёт характеристик ИС. Более высокочастотный вариант был изготовлен и по эпитланарному процессу. Первые эпитланарные ТС с узким эмиттером (так называемый вариант «полного» эмиттера шириной менее 1 мкм) даже без пассивной области на основе $Si^*(P)$ позволили получить образцы ИС ЭСЛ типа сверхвысокого быстродействия с рекордным для тех лет $t_{\text{пр}} = 0,5$ нс [4]. Данных по надёжности таких ТС и ИС ещё не было. Естественно, что разработчики аппаратуры не были готовы к их применению. К нам обратились только из института ядерных исследований. Они получили образцы для построения измерительной системы.

Субнаносекундные ИС типа MECL-III на фирме Моторолла также были в стадии исследования.

За рубежом технология селективной эпитаксии нашла самое широкое применение в различных вариантах при изготовлении биполярных и полевых микроволновых ТС. Стало возможным создание селективных локальных областей из Si^* и металла, например, W – столбиков или W – шин для металлизации базовых пассивных областей по Si^* , а также ультратонких областей базы на основе не только Si, но и сплава Si-Ge-B, а впоследствии и Si-Ge-B-C.

Зарубежные аналитики, утверждая, что в СССР всегда копировали их новые ИС, были, явно, не в курсе дела.

Уже в самом начале 1970 г. эпитланарные ТС должны были заменить также ТС с полной диэлектрической изоляцией, выполненные по зарубежной “ЭПИК”-технологии.

Разработка структур с полной диэлектрической изоляцией

Микрофотография ИС ПЗУ на всей пластине Si диаметром 24 мм дана на рис. 22а (НИР «Моноблок», ОКР «Моноблок-II». Гл. конструктор Ю.Н. Дьяков, зам. гл. конструктора по технологии – Н.М. Луканов).

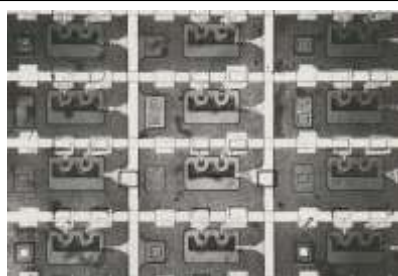


Рис.22а. Микрофотография ИС ПЗУ на круглой пластине Si.



Рис. 22б. ИС ПЗУ в корпусе.

Структуры имели полную диэлектрическую изоляцию на основе плёнки SiO_2 и формировались по “ЭПИК”-технологии на основе поликремния. Алмазную шлифовку и полировку осуществлял Олег Иванович Бочкин. Селективное легирование диодов золотом после алмазной полировки давало малые токи утечки. Впервые ИС создавались на всей пластине Si и фактически представляли БИС ПЗУ на кристалле круглой формы. Также впервые при сборке был применён круглый корпус с количеством выводов 48 штук (рис. 22б). В 1988 г. такой подход к созданию БИС на одном кристалле со стороной 10-15 мм был предложен в конкурсной работе ППИ НПО “НЦ” И.В. Бергом, но при использовании концепции мини фабрики

модульного типа.

Разработка и внедрение новых групповых процессов и структур с различными профилями легирования

Первые высокопроизводительные процессы с большим количеством пластин (помимо термического окисления) были получены при низкотемпературном вакуумном пиролитическом осаждении $\text{SiO}_{2\text{П}}$, используя ТЭОС (тетраэтоксисилан) в качестве реагента [2,3]. Диффузия В под плёнкой $\text{SiO}_{2\text{П}}$ и в областях без неё давала диффузионные профили, существенно отличающиеся друг от друга при проведении термического отжига в атмосфере сухого кислорода. Как было показано выше на рис. 12 профили 6 и 5 соответствовали этой ситуации. Существенное перераспределение атомов бора во вновь нарастающую плёнку $\text{SiO}_{2\text{T}}$ давало возможность получать точно локализованные пассивные и активные области базы относительно границ в плёнке $\text{SiO}_{2\text{П}}$. Для практического применения этого эффекта требовалось обеспечить однородную диффузию бора и высокое качество пиролитического $\text{SiO}_{2\text{П}}$. Первая задача была решена быстро, используя на первой стадии диффузии В процесс диффузии в герметичном боксе с разбросом по ρ_s на пластине не более 2-3%. Высококачественные плёнки $\text{SiO}_{2\text{П}}$ удалось получить при резком уменьшении парциального давления реагента, очень медленного его напуска и двухкратной перегонки реагента, а также при введении азотной ловушки. Исследование легированных фосфором тонких плёнок двуокиси кремния, полученных в процессе низкотемпературного разложения тетраэтоксисилана, приведено в работе [22]. Исследование характеристик плёнок $\text{SiO}_{2\text{П}}$ для различных применений проведено в работах [23,24, 26-27]. Исследование динамических параметров ТС проводилось по оригинальному методу, изложенному в работе [25].

Формирование высоконадёжных и сверхтонкослойных ТС

ТС с использованием воспроизводимых и однородных слоев $\text{SiO}_{2\text{П}}$ и с составными областями базы стали называть ТС с «2С»-профилем легирования (т. е. сверхтонкими и составными). Применение быстрого процесса перераспределения бора в малоинерционной установке с ламповым отжигом при левитации пластин в течение 3 мин при температуре 1150°C в сухом кислороде позволяло уверенно получать воспроизводимые параметры надёжных «С»-ТС и УТС с

самоформируемыми областями низкоомной пассивной и высокоомной активной базы.

Формирование тонкослойных ТС

Тонкослойные ТС (профиль – “Т”) с маскирующим слоем на основе SiO_2 успешно продолжал исследовать В.Н. Кокин. Структуры имели $w_{\text{аб}} = 0,25-0,2$ мкм. Эти исследования легли в основу его диссертационной работы. Естественно, что между «С»- и «Т»-профилями в лаб. №23 возникла конкурирующая ситуация мирного соревнования. По “Т”-технологии Вильяму Николаевичу после 1975 г. пришлось решать интересную проблему, связанную с надёжностью изопланарных тонкослойных ТС с так называемым «промывочным» вариантом пристеночных эмиттерных областей. Но это отдельная тема. А пока Вильяма Кокина и других моих сотрудников ожидали непредвиденные проблемы, удачные решения и, иногда, разочарования. Большие колебания возмущающих факторов, связанных как с внешними условиями, так и с внутренними механизмами диффузии, приводили либо к закорачиванию р-п переходов, либо к их частичному смыканию с увеличением токов утечки. Паразитные воздействия внешних условий были связаны с колебаниями: – температуры и времени диффузии и отжига, концентрации паров диффузанта, парциального давления кислорода или паров воды, скорости установления поверхностной концентрации легирующей примеси, скорости установления термически равновесных условий, связанных с прогревом лодочки и пластин Si, скорости охлаждения и др. факторов. Трудно контролируемые внутренние факторы были связаны с исходными дефектами в Si, с генерацией дислокаций и групповых дефектов, равновесных и неравновесных вакансий, взаимодействием легирующих примесей, эффектами внутренних электрических полей и полей механических напряжений, взаимодействием примесей и вакансий и др. причинами. Систематизированные исследования тонкослойных ТС позволило установить закономерности, связывающие электрические параметры структур с характеристическими параметрами ФС, а также с внешними и внутренними условиями диффузии и термического окисления.

Формирование ТС с мелким профилем легирования

Мелкому профилю «М» для будущих разработок ИС серии K138 повезло больше, т. к. ряд этих проблем его не коснулся, а полученный опыт успешно учитывали уже опытные Валера Лебедев, Валентина

Сладкова, Надежда Беркова и Владимир Карабанов. В работе время протекало быстро, – и каждый сотрудник лаборатории обрел свой характер и требовал индивидуального подхода к себе. Особенно Миша Небольсин, который был влюблён в свою диффузию В, отчаянно отстаивал свои результаты, иногда сердился, – и много раз перепроверял свои опыты, пытаясь отстоять свою правоту. Он доказывал, что питатель (с VBr_3) с правильно выбранным зеркалом испарения и оптимальной геометрией не обязательно принудительно термостатировать. Достаточно найти ему подходящее место в скафандре, где изменение температуры минимально. Он заслужил повышенного внимания к себе. Уже в 1970 году в ОКР [4] ему и предстояло завершить разработку технологии диффузии бора на пластинах Si диаметром 40 мм с большим коэффициентом групповой обработки, но с принудительным термостатированием испарителя.

Высокопроизводительные процессы диффузии

Успешно прошло внедрение на завод «Микрон» как процессов диффузии В и Р с высоким групповым коэффициентом обработки пластин Si диаметром 40 мм, так и процесса диффузии золота для ТТЛ ИМС при защите обратной поверхности Si плёнкой пиролитического диоксида кремния. Контроль за ответственными перед НПО «НЦ» темами вёл лично директор К.А. Валиев.

Воспроизводимость и однородность параметров типовой диффузии Р (рис. 23а) была существенно улучшена за счёт введения параллельных насыщенных Р дополнительных источников диффузанта (рис. 23б) [4].

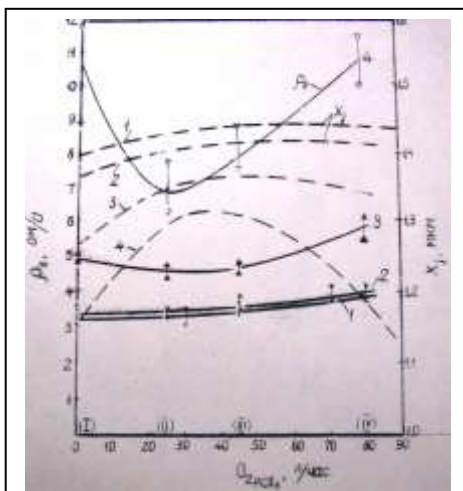


Рис. 23,а. Зависимости ρ_p и глубины x_j слоев Р от режимов - 1 метод диффузии фосфора.

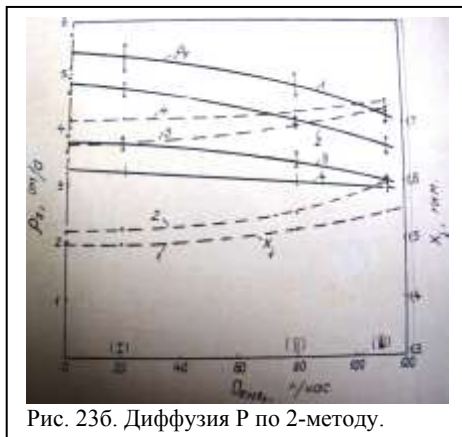


Рис. 23б. Диффузия Р по 2-методу.

На все процессы были получены Акты о внедрении. На ряд разработок были получены Свидетельства ВДНХ об участии в творческом конкурсе.

Хорошо поставленная в НИИМЭ система подачи рационализаторских предложений, – совершала своё полезное дело. И в лаборатории №23 она являлась одним из звеньев для активизации творческой инициативы у рабочих и инженеров.

Очень удачное рацпредложение (№4297 от 11.04.1975 г.) было связано с внедрением на диффузионных установках специализированного кварцевого герметичного контейнера, позволявшего хранить рабочие пластины Si в атмосфере сверхчистого азота, транспортировать их из него в реакционную зону и помещать их снова в контейнер после процесса (рис. 23в).



Рис. 23в. Кварцевый герметичный контейнер.

Постановка в 1969 г. новых процессов диффузии В с большим количеством пластин потребовала введения в реакционную зону существенно большей интегральной концентрации реагента, что привело к возникновению новой проблемы, связанной с образованием трудно растворимой фазы $\text{Si}_x\text{B}_y\text{O}_z$ на поверхности Si. Решение было найдено путём введения дополнительной операции относительно низкотемпературного «раскисления» этой фазы в окислительной среде, что и было зафиксировано выдачей нам свидетельства о рационализаторском предложении (РП) (№728 от марта 1969 г.).

Немного позже, аналогичный подход к этой проблеме был описан в зарубежной статье⁶.

Важное рацпредложение касалось решения проблемы, связанной с контролируемым травлением плазмохимических плёнок диоксида кремния $\text{SiO}_{2\text{ПХ}}$ на алюминии (РП № 3373 от 17.12.1974 г.) при создании многоуровневой металлизации на основе барьерного подслоя Мо и токоведущего слоя Al.

Разработку серийного варианта (рис. 23г) автоматизированных систем диффузии и окисления с герметичными контейнерами удалось сделать через несколько лет с привлечением мощностей московского КБПМ, используя опыт, накопленный в совместных разработках с подразделением, возглавляемым Федором Курмаевым.



Рис. 23г. Промышленный вариант газовой системы.

Удачное решение для герметичных контейнеров было достигнуто за рубежом в “SMIF”-системах.

Суммируя результаты, можно сделать очевидный вывод. Молодой коллектив лаборатории №23 НИИМЭ за 5 лет, буквально на одном дыхании, сделал прорыв в области разработки новых конструктивно-топологических и структурно-технологических базисов изготовления сверхбыстродействующих ИС на мелких, тонких и сверхтонких ТС. Были заложены основы для создания будущих ультрабыстродействующих УБИС на ультратонких ТС. По ряду исследований, например, по эпиланарным ТС для будущих БИС, ТС с поликристаллическими пассивными эмиттерными областями, легированными Р, быстрым отжигам, сверхтонким скрытым слоям, легированных As со специальным отжигом в водороде, и сверхтонким эпитаксиальным плёнкам достигнуты результаты, существенно опережающие по времени зарубежные поисковые работы.

В отделе №22 была успешно применена практика решения сложных проблем с привлечением не только своих сотрудников, но и специалистов с других подразделений и предприятий. Ставилась задача, детально рассматривались различные пути её решения, устанавливались сроки, выдвигался ответственный исполнитель, составлялся план исследований и проводилось регулярное обсуждение результатов поиска. Такой подход привёл к быстрому и эффективному решению ряда интересных проблем, завершившихся выпуском ряда оригинальных статей в специализированных журналах, заявок на изобретения и рацпредложений. Была реализована своеобразная фабрика генерации новых идей и их практической быстрой апробации. Среди этих работ стоит особо отметить наиболее важные и опубликованные позже (см.

Приложение №2 к списку Литературы):

- Н.М. Луканов. Полуавтоматическая диффузионная установка для проведения диффузии с использованием жидких источников диффузанта, – 1969.
- Н.М. Луканов, В.Н. Кокин, В.И. Сладкова. Влияние режимов диффузионного процесса на параметры диффузионных слоев, – 1969.
- Е.С. Любимов, Н.М. Луканов, Г.Ф. Краснова, М.В. Небольсин, В.И. Сладкова. Некоторые вопросы изготовления кремниевых эпитаксиальных структур с диффузионными скрытыми слоями, – 1969.
- Н.М. Луканов, В.В. Лебедев, В.Н. Кокин, З.И. Хорина. Кремниевые интегральные транзисторы на тонких диффузионных слоях, – 1969.
- К.А. Валиев, Н.М. Луканов, М.В. Небольсин, Н.М. Беркова. Высокопроизводительные процессы диффузии фосфора и бора в производстве интегральных схем, – 1970.
- В.Н. Кокин, Н.М. Луканов, В.В. Лебедев. Формирование интегральных транзисторных структур на тонких диффузионных слоях с применением термически выращенного маскирующего окисла, – 1970.
- Баранов В.Н., Большаков Ю.В., Иванов В.И., Луканов Н.М., Попов В.М., Фомин Г.А., Родионов А.В. Лучистый нагрев в микроэлектронном производстве, – 1971.
- В.В. Карабанов, Н.М. Луканов, В.В. Лебедев. Модифицированный метод диффузии фосфора и бора в производстве интегральных схем на тонких диффузионных слоях, – 1971.
- Н.М. Луканов, В.В. Лебедев. Формирование интегральных сверхбыстродействующих транзисторов с низкоомной базой, – 1971.
- Н.М. Луканов, В.В. Лебедев, Е.С. Любимов, Е.Н. Любушкин, К.-Г.М. Шварц и А.А. Щербинин. Новая конструкция элементов интегральных схем, – 1971.
- А.П. Голубев, Н.М. Луканов, В.В. Лебедев, И.В. Малышев, Н.В. Семученков. Влияние параметров транзисторов на частотные характеристики линейных полупроводниковых интегральных схем, – 1971.
- Баранов В.Н., Большаков Ю.В., Иванов В.И., Луканов Н.М., Попов В.М., Фомин Г.А., Родионов В.В. Лучистый нагрев в микроэлектронном производстве, – 1972.
- Н.М. Луканов, В.В. Лебедев. Электрические параметры тонкослойных транзисторных структур с низкоомной базой, – 1972.
- Н.М. Луканов, В.В. Лебедев, Е.С. Любимов, В.А. Марасанов, В.В. Мартынов, К.-Г.М. Шварц и А.А. Щербинин. Получение эпитаксиально-диффузионных структур с боковой диэлектрической изоляцией, – 1972.
- Долгов В.В., Луканов Н.М. Исследование и контроль контактного

сопротивления металлизации на компонентах сверхбыстродействующих интегральных схем, – 1973.

- Н.М. Луканов, Е.С. Любимов, В.Н. Кокин, Н.М. Манжа, Н.В. Пережогин. Перераспределение мышьяка в скрытых слоях в процессе термообработки в потоке водорода, – 1974.

- Баранов В.Н., Ефишова З.Е., Иванов В.И., Козлов Н.Ф., Круглов Л.М., Луканов Н.М., Сапронов В.И., Фомин Г.А. Особенности ИК нагрева в процессах диффузии, окисления и вжигания алюминия, – 1974.

- Яковенко В.Г., Луканов Н.М., Лабутин Н.И., Пошин В.Г., Винокуров Н.И. Вытравливание «окон» в плёнках двуокиси кремния на алюминиевых контактных площадках ИС, – 1975.

Разработка в НИИМЭ сверхбыстродействующих ИС ЭСЛ типа серии К138 для ЭВМ «Ряд-2»

В итоге, мы “подкованно” подошли к рубежу 1969 года, когда в стране остро назрела в связи с её изоляцией необходимость перевооружения. В статье [1] отмечалось: «По решению Совета Министров СССР с целью дальнейшего увеличения быстродействия и производительности ЭВМ второго поколения «Ряд-2» и быстродействия различных систем автоматики, работающих в реальном масштабе времени, НИИМЭ было поручено в интересах НИЦЭВТ провести в очень сжатые сроки разработку сверхбыстродействующих интегральных микросхем (ИМС) ЭСЛ-типа серии К138. ИМС должны были иметь типовое значение среднего времени задержки распространения сигнала $t_{зрс} = 1,9$ нс на базовый логический вентиль. Главным конструктором разработки был назначен Н.М. Луканов. Перед этим за месяц коллективу удалось изготовить базовый вентиль ЭСЛ схемы в трёх вариантах с профилями легирования “М”, “Т” и “С”, что означало мелкий, тонкий и сверхтонкий. Изготовленные по этим профилям ИМС имели $t_{зр} = 2,5; 2$ и $1,5$ нс, соответственно». Уменьшение $t_{зр}$ всего на $0,5$ нс потребовало переходов на новые конструктивно-технологические базисы (КТБ).

Реально с этого «*маленького казуса*» всё и началось. Директор института, буквально, вынужден был спасать НИР «Искра» [6], проводимую схемотехником С.И. Назаровым в соседнем разрабатывающем отделе В.Я. Контарева. Разработку технологии вёл Олег Крамаренко – очень настойчивый и трудолюбивый инженер. Сергей Назаров попытался скорректировать маршрут создания ИМС ЭСЛ типа серии К137¹³

(¹³ Валиев К.А., Контарев В.Я., Крамаренко О.И. Интегральные логические микросхемы высокого быстродействия на переключателях тока серии 137 // Электронная техника, сер. Микроэлектроника, 1971, вып. 4).

Требуемого по ТЗ на НИР «Искра» быстродействия в 2-3 нс, – не получилось. Да и не могло получиться, т. к. необходимо было менять всю идеологию подхода к изготовлению сверхбыстродействующих ИС, а не корректировать имеющийся проект. Передавать технологию из одного подразделения в другое было явно абсурдно. К.А. Валиев нашёл решение и поручил тогда молодому коллективу лаборатории №23 «вытянуть» НИР «Искра», используя поисковые работы по исследованию СВЧ ТС. Разумеется, со стороны нач. лаборатории никакого отказа не могло последовать. Более того, это было знаком особого доверия, – наши наработки, наконец, оценили по заслугам.

И далее в статье [1] отмечалось: «Специалисты НИЦЭВТ Файзулаев Б.Н., Гринкевич В.А. (а также схемотехник Вячеслав Саморуков. – *дополн.* автора) совместно с очень грамотными специалистами по схемотехнике НИИМЭ Владимиром Немудровым (будущим академиком), Вячеславом Струковым, Дмитрием Чутуевым (и привлечённым Сергеем Назаровым – *дополн.* автора) очень быстро спроектировали 12 типов микросхем, составивших функционально полный базис. Эти ИМС в дальнейшем вместе со схемами серии 500 предназначались и для построения модернизированных ЭВМ ЕС-1035, ЕС-1045, ЕС-1052 и ЕС-1060¹⁴

(¹⁴ Пржиялковский В.В. Исторический обзор семейства ЕС ЭВМ. НИЦЭВТ. Виртуальный компьютерный музей).

Наши оригинальные по простоте ТС на основе мелких (М) слоёв (рис. 24) имели на подложке (1) р-Si: – скрытый слой; (2), легированный As, 15 Ом/квadrat; – тонкую эпитаксиальную плёнку (3) – 6 мкм, 1,5 Ом*см; – изолирующие области (4) – 7 мкм, $\rho_s = 5$ Ом/квadrat; – контактные коллекторные области (5) – 1 мкм, 6,5 Ом/квadrat; – контактные области базы (6) и – внутренние области базы (7) – 1,3 мкм, 130 Ом/квadrat; – активные области (8) базы 0,3 мкм; – эмиттерные области (9) – 1 мкм, 6,5 Ом/квadrat. Успех реализации таких ТС определялся как высокой степенью управления технологическими процессами и их воспроизводимостью, так и хорошо отработанной ФС на М-профиле. В работе активное участие принимали технологи В. Лебедев, Н. Беркова, В. Сладкова, В. Карабанов, М. Небольсин.



Рис. 24. Конструкция ТС с М-профилем и микрофотография одной ТС.

Принципиальные электрические схемы ИМС 1ЛБ382 и 1ТР381 даны на рис. 25а. Логические схемы построены на основе базового элемента – токового переключателя со встроенным температурно-компенсированным источником опорного напряжения. Высокое быстродействие обеспечивается за счёт работы транзисторов в ненасыщенном режиме, близком к режиму работы транзисторов в схеме с общей базой, за счёт малого логического перепада (0,86 В), а также за счёт оптимизации основных параметров мелкой ФС. Базовая схема имеет парафазный выход. Объединение микросхем по «ИЛИ» на выходе осуществляется путём присоединения выходов ИС (эмиттерных повторителей) к одному нагрузочному резистору («проводное ИЛИ»). Благодаря низкому выходному импедансу все элементы серии могут работать на линию передачи с волновым сопротивлением $Z_B=50$ Ом при незначительном изменении быстродействия в широком диапазоне ёмкостных нагрузок.

Базовый элемент характеризуется малой величиной помех, возникающих в шинах питания. Встроенный источник опорного напряжения обеспечивает практически постоянную по величине помехоустойчивость в рабочем диапазоне температур от минус 10°C до плюс 70°C . Микросхемы К138 конструктивно оформлены в пластмассовый корпус типа 301ПЛ14-1.

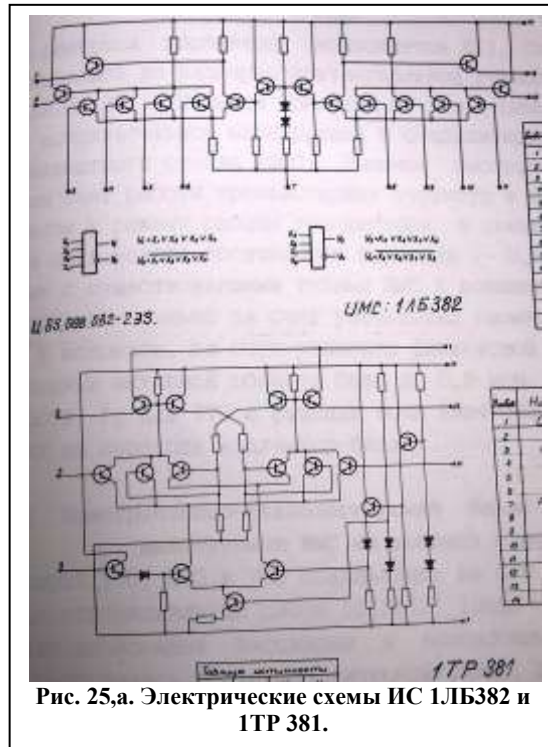


Рис. 25,а. Электрические схемы ИС 1ЛБ382 и 1ТР 381.

Для реализации последующих более быстродействующих ИС с существенно большей плотностью размещения элементов продолжались работы по оптимизации сверхтонкослойных ТС (с составными областями базы и точно локализованным узким полным эмиттером).

Математическое моделирование с учётом распределённых параметров ФС проводил Вячеслав Яковлевич Кремлев, привлечённый сотрудник из подразделения Г.Г. Казенного.

Детальное исследование параметров ТС и характеристик ИС в температурном диапазоне дано в работах [6-8]. В таблице 1 приведены состав, эксплуатационные характеристики микросхем серии К138 и даны следующие обозначения: – максимальный коэффициент объединения по входу M , – максимальный коэффициент разветвления по выходу N (при $R_H=50 \text{ Ом}$), – среднее значение потребляемой мощности P_p , мВт, – среднее время задержки распространения сигнала $t_{зр}$, нс.

Таблица 1. Состав и характеристики ИС серии К138

Наименование микросхемы серии K138	Тип ИМС	M	N	P _п , мВт	t _{зр} , нс
Восьмивходовой элемент ИЛИ-НЕ/ИЛИ	1ЛБ381	8	10	35	2,9
Сдвоенный четырёхходовой элемент ИЛИ-НЕ/ИЛИ	1ЛБ382	4	10	176	2,9
Счетверенный двухходовой элемент ИЛИ-НЕ	1ЛБ383	2	10	170	2,5
Счетверённый двухходовой элемент ИЛИ	1ЛБ384	2	10	150	2,6
Синхронный триггер R-S	1ТР381	-	10	80	3,4
Синхронный триггер D с установочными входами R-S.	1ТР382	-	10	77	3,7
Счетверённый приёмник сигнала с линии	1ЛП381	-	10	120	1,9
Два синхронных триггера D с управлением	1ТК381	-	10	125	3,5
Логический элемент 4-3-3-ИЛИ-4ИЛИ	1ЛС381	-	10	120	3,5
Два логических элемента 2-3ИЛИ-2И	1ЛС382	-	10	100	3,5
Два логических элемента 2-2ИЛИ-2И/2-2ИЛИ-2И-НЕ	1ЛБ385	-	10	100	3,5
Два логических элемента сложения по "mod 2"	1ЛМ381	-	10	100	3,5

Помехоустойчивость ИМС составляла от 190 мВ (1ТР382) до 230 мВ (1ЛБ384), частота усиления по току ТС – (1 – 1,5) ГГц при I_к = 10 мА и U_{кэ} = 1,5 В.

Топологии кристаллов ИС «Искра» и ИС серии K138 даны на рис. 26а–26з.

Наименьшую величину t_{зр} = 1,9 нс имели ИМС счетверенного приемника сигнала с линии 1ЛП381 (рис. 26,б). Этот приёмник, состоящий из дифференциального каскада с одним выходом через эмиттерный повторитель и имеющий стандартные логические уровни, может работать на линию передачи с входным сопротивлением 50 Ом. Дифференциальные входы позволяют использовать данный элемент для приёма информации от «скрученной пары» проводников, от линий передачи, возбуждаемых любым из элементов с парафазным выходом; при этом происходит подавление синфазной помехи, и тем самым обеспечивается возможность передачи сигнала с помощью линий большой длины при повышенном уровне наводимых помех.

Триггеры (рис. 26 г,з), как и элементы И-ИЛИ/И-ИЛИ-НЕ,

построены на базе двухуровневой схемы переключения тока, что обеспечивает выигрыш по потребляемой мощности по сравнению с вентильным способом построения триггеров, высокую стабильность статических параметров при действии различных дестабилизирующих факторов (напряжения питания, температуры, технологического разброса параметров компонентов ИС). В триггерах 1ТР381 и 1ТР382 используется “положительная” синхронизация, т. е. информация записывается при логической “1” на синхровходе, в триггере 1ТК381 используется “отрицательная” синхронизация. Грамотно и быстро конструкторскую документацию и ТУ на ИМС разрабатывал очень трудолюбивый и грамотный Василий Балацкий из отдела энергичного Журавлева Юрия Дмитриевича. Большую работу провёл коллектив Главного конструктора завода Г.Д. Федорова. Главные технологи НИИМЭ – Борис Казуров и завода – Антон Просий, не имели претензий к разработке и подписали Акты о приоритете и внедрении. С представителями отдела технического контроля (ОТК) и заказчика (ПЗ) от военных Александром Комаровым и его начальником у нас сложились доверительные и деловые отношения. Здесь не было никаких дворцовых тайн. Очень редкие срывы на отдельных процессах у нас никто не скрывал. Не было ни одного случая при проведении партий, когда потребовалось бы вмешательство тов. Ю.Н. Афанасьева – руководителя ПЗ. Внедрение ИМС К138 проходило на заводе «Микрон» исключительно успешно и быстро в цехе № 04. Сборку проводили в цехе № 03, где начальником была энергичная и грамотная С.А. Громова.

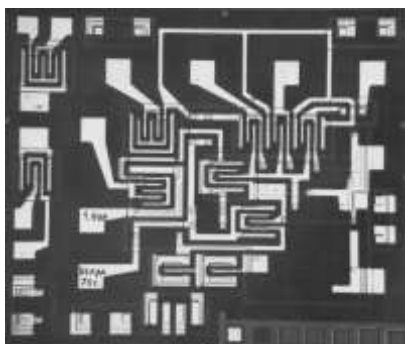


Рис. 26,а. Топология кристалла ИС по НИР «Искра».

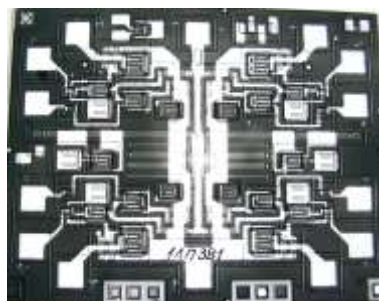


Рис. 26,б. Топология кристалла ИС - 1ЛП381.

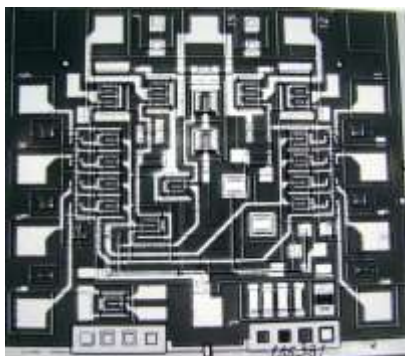


Рис. 26,в. Топология кристалла ИС серии К138 «Искра» - тип 1ЛБ381.

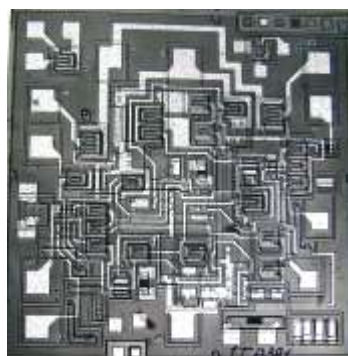


Рис. 26,г. Топология кристалла ИС - синхронный триггер R-S - тип 1ТР381.

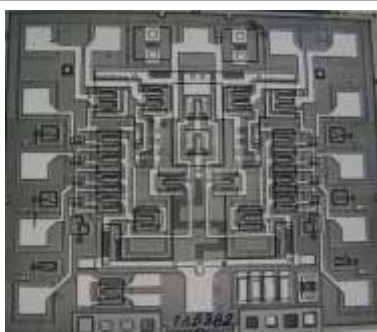


Рис. 26,д. Топология кристалла ИС серии К138 «Искра» - тип 1ЛБ382.

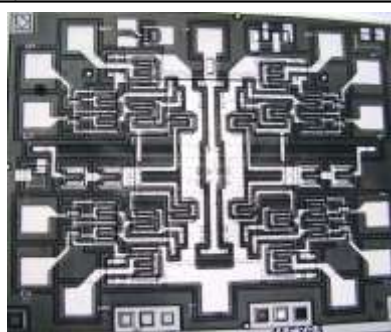


Рис. 26,е. Топология кристалла ИС серии К138 «Искра» - тип 1ЛБ383.

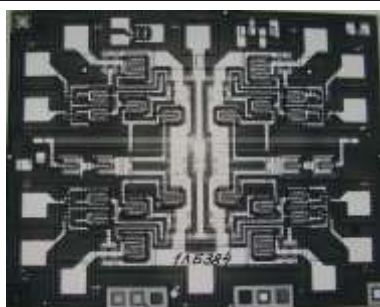


Рис. 26,ж. Топология кристалла ИС серии К138 «Искра» - тип 1ЛБ384.



Рис. 26,з. Топология кристалла ИС серии К138 «Искра» - тип 1ТР382.

Директор завода Игорь Сергеевич Романычев оказывал самую действенную и заинтересованную помощь, решая все вопросы оперативно и на высоком уровне. Также успешно и быстро прошло внедрение серии К138 на предприятии п/я В-8492 (руководитель В. Козлов) в г. Новосибирске. Получен Акт о внедрении групповых процессов и серии из 12 типов ИМС.

За разработку оригинальной технологии в 1972 году Н.М. Луканов был награждён Почетной Грамотой им. А.С. Попова (рис. 27).

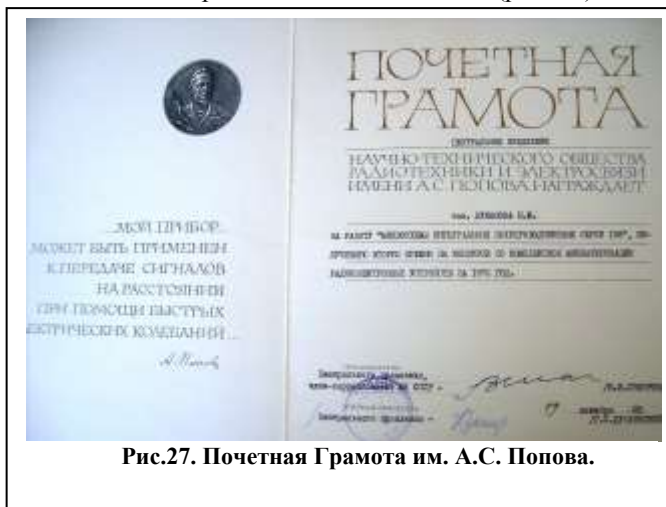


Рис.27. Почетная Грамота им. А.С. Попова.

Правительство СССР высоко оценило труд коллектива по разработке ИМС серии К138. Группе разработчиков была присуждена премия Ленинского комсомола уже в 1970 г. (на рис. 28 для наглядности Золотая медаль совмещена с дипломом).



Рис.28. Диплом и медаль Лауреата премии Ленинского комсомола

Разработка первых сверхбыстродействующих ИС ЭСЛ типа серий 100, 500, 700 в НИИМЭ для противоракетного щита страны

«По решению Совмина и ВПК в этом же 1970-м году МЭП СССР было поручено начать разработку серий 100, 500 и 700 сверхбыстродействующих ИМС ЭСЛ-типа с типовым на базовый логический вентиль $t_{зр} = 2,5$ нс. Ближайшим зарубежным аналогом таких ИМС были схемы корпорации Motorola серии MC10000. Схемы подобного класса крайне необходимы были стране для создания высокопроизводительного сверхбыстродействующего комплекса супер-ЭВМ “Эльбрус-2”, предназначенного для построения противоракетной оборонной системы страны.

Курирование разработки ИМС со стороны МЭП СССР было поручено заместителю министра МЭП В.П. Колесникову, со стороны

Научного Центра – Генеральному директору А.В.Пивоварову, от заказчика – Академику, директору института точной механики и вычислительной техники (ИТМиВТ) – С.А.Лебедеву. Специалисты ИТМиВТ В.С.Бурцев, В.С.Чунаев, Ю.К.Кушнер, А.А.Новиков и Г.И.Гришаков сделали ставку на применение ИМС типа МС10000, поскольку они изготавливались по самой передовой зарубежной технологии, а элементная база была наиболее функционально полной. Разработчики системы «Э» имели уже техническую документацию на применение этих схем и образцы для измерения. Эти схемы имели относительно большое время нарастания и спада сигнала и по этой причине должны были вносить меньше проблем, связанных с помехами и передачей сигналов по двухслойным шинам металлизации». Тогда, по-видимому, они думали, *«что лучше иметь курицу на земле, чем синицу в небе. И были по- своему правы»* [1]. Обсуждение проблемы с участием специалистов из НИИМЭ и ИТМиВТ проходило на совещании у Анатолия Васильевича Пивоварова. Мы доказывали, что можем делать ИМС с параметрами лучшими, чем у ИС МС10000. Они настаивали на своем выборе.

Наконец, академик С.А. Лебедев не выдержал и со свойственным ему акцентом и уверенностью в правоте своего выбора заявил:

- Что он понял, что КамЫл Ахметович не готов делать такие схемы в необходимые для страны сжатые сроки и поэтому он будет ставить этот вопрос в Политбюро.

На это А.В. Пивоваров отреагировал мгновенно, попросив всех оставить кабинет и, обращаясь к Валиеву, официальным тоном сказал:

– А Вы, Камиль Ахметович, оставайтесь!

Мы ожидали за плотно прикрытой дверью. Вскоре вышел Валиев.

– Будем делать! – отрезал он.

Так было принято историческое решение о начале соревнования с США по гонке в области создания новых супер-ЭВМ и систем автоматики. [1]

Через несколько лет Бурцев Всеволод Сергеевич, работая уже в РАН, объяснил мне почему они твёрдо настаивали на схемотехнике ИС МС10000. У них уже была книга руководство по применению этой серии и они сделали её перевод. Четвёртую копию перевода он подарил мне на память. Этот экземпляр я сохранил как память о встрече с выдающимся разработчиком системы «Эльбрус-2».

События тех лет, мои личные их оценки и перипетии, связанные с принятием этих решений, были изложены в статье [1]. К схемотехническим работам из отдела талантливого Г.Г. Казеннова, – будущего академика, – были дополнительно привлечены грамотные сотрудники Георгий Эдуардович Широ (гл. конструктор НИР

«Имитатор», – 1971 г., НИИМЭ) и Л.П. Холоднова.

Что же подвинуло руководство НИИМЭ пойти на рискованный шаг и снова поручить молодым специалистам такое сверхответственное задание? За срыв Правительственного решения можно было лишиться должности и всех привилегий, а также и получить новую форму тела с «выкрученными назад руками» (по очень меткому и образному выражению А.В. Пивоварова [1]). Был ли другой вариант. Ответ – отрицательный, – нет, – не был. Ни один из руководителей четырёх предприятий МЭП по словам В.П. Колесникова не проявил желания взять на себя такую ответственность. И дело не только в том, что по меткому выражению Ларошфуко: – «никто не может навредить нам больше, чем мы сами себе». А дело было в необходимости понимания ***Особой Государственной Важности Задания***. И готовности предприятия быть головным. И руководство МЭП это отлично знало и сообразно с этим действовало.

Вот тогда то, в короткие сроки и был организован на новых площадях новый Отдел № 22 разработки сверхбыстродействующих ИМС [1].

Начальник участка диффузии, окисления и пиролиза Алешин Николай Васильевич – жёсткий и знающий организатор, обеспечил ритмичную работу участка и быстрое прохождение партий. Ему в помощь были выделены инженеры В.В. Красильникова, Л.В. Цветков и А. Никольский.

В сжатые сроки специалистами Виктором Поповым, А.Д. Серовым, Зинаидой Колюскиной и нач. лаб. Е.С. Мининим были разработаны методики аттестации ИМС ЭСЛ-типа. Измерения проводили В.Д. Клопенков, А.Ю. Шишкин, Т.Н. Яценко, В.И. Максимова. Очень отличился инженер Евгений Ильчинский, создав оригинальную установку для контроля динамических параметров сверхбыстродействующих ИС [25].

Начальник лаборатории фотолитографии Геннадий Старожук и его сотрудники Галина Некрасова, Вера Степанова вместе с В.П. Бушкаревой, Л.Г. Пироговой, Л.Г. Макалкиной и Т.Н. Апраксиной. тоже отличились, – они быстро поставили процессы фотолитографии на основе разработанного в НИИМЭ Михаилом Афанасьевым фоторезиста РН-7.

Очень энергичная нач. лаб. Алевтина Родионова со своими сотрудницами Валентиной Николаевой, Любовью Адерихиной, Людмилой Маховой, детально исследовали и поставили новые процессы химической отмывки на основе одностадийных процессов с применением перекиси водорода (А.с. №480334, с приоритетом от

25.03.1973 г.).

Нач. лаб. Максуд Джабраилов и его сотрудники Геннадий Ишков, Виктор Щербина, Людмила Морозова проводили измерения и анализ зарубежных и наших кристаллов ИС, набирали статистические данные по статическим и динамическим параметрам и выясняли причины брака. Ряд схем имел двухуровневую систему металлизации.

Очень ответственный и грамотный начальник лаборатории Виталий Яковенко и его сотрудники Александр Сулимин, Владимир Долгов, Татьяна Челпанова, Галина Винокурова, Фокина Светлана, Владимир Ячменев, Александр Гоголь и Т.И. Стрижкова не жалели ни сил, ни времени. В сжатые сроки нам удалось не только разработать технологию двухслойной металлизации, но и получить на неё Авторское свидетельство (А.с. №69164, с приоритетом от 10.09.1971 г.). Проблемы межслойных закороток и рельефа поверхности нами были впервые успешно решены путём применения двукратного осаждения плазмохимического диоксида кремния и двукратного отдельного нанесения фоторезиста. Проблему закорачивания сверхтонких диффузионных слоёв решили за счёт использования композиционной системы металлизации на основе: тонкий барьерный слой Мо и проводящая плёнка Al. В этой работе отличился Владимир Долгов.

Результаты исследований процессов формирования ИС с двумя слоями металлизации и защитным слоем плазмохимического пиролитического диоксида кремния $\text{SiO}_{2\text{ПХ}}(\text{P})$, легированного фосфором, отражены в ряде работ по НИР и ОКР [22-27].

Ряд кристаллов ИС МС10000, переданных нам В.С. Бурцевым, по своей физической структуре были ближе всего к кристаллам ИМС серии К138 с профилем «М». Но какие-то новые кристаллы, явно, не вписывались в эту линию (рис. 29).

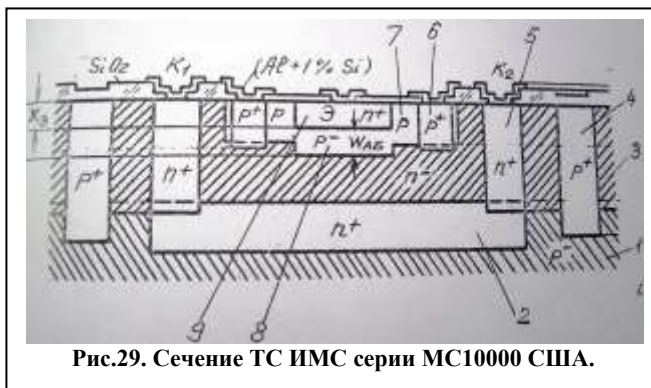


Рис.29. Сечение ТС ИМС серии MC10000 США.

Наши «Т» и «С»-профили больше всего подходили к ним, так как имели толщину активной области базы $w_{аб}$ от 0,25 до 0,1 мкм. Зарубежные образцы ИС серии MC10000 не всегда были ясны по совокупности всех электрических параметров, скрывая от нас своё внутреннее устройство под непрозрачной пассивирующей и защитной плёнкой фосфорносиликатного неоднородного по толщине стекла. Это позволило нам обосновать Представителю Заказчика (ПЗ) новые требования к внешнему виду наших кристаллов с прозрачной и чистой защитной плёнкой $SiO_{2пх}(P)$ и утвердить их.

Анализ сечения кристалла ИС MC10000 по косому шлифу показал (рис. 29) наличие глубоких низкоомных контактных коллекторных областей (5) и углубленных контактных областей базы (6). Активные области (8) базы имели ширину 0,3 мкм, эмиттерные области (9) были легированы не мышьяком, как ожидалось, а фосфором. Первый слой металла был на основе Al, легированного Si ($\approx 1\%$).

Это сечение было выбрано нами в качестве каркаса, который предстояло наполнить вещественным содержанием. В каркас легко вписывались наши профили «М», «Т» и «С». В итоге, обоснованно был выбран «С»-профиль. К этому времени были проведены уже испытания ИС и ТС на надёжность, долговечность и безотказность, набрана статистика по параметрам. Заключение о радиационной стойкости сверхтонких структур и ИС было положительным. Сечение (рис. 29) наполнилось конкретными цифрами. На подложке Si (1) ЭКДБ-10 появились: – скрытый слой (2), легированный As, 5 мкм, 15 Ом/кв.адат; – тонкая эпитаксиальная плёнка (3) 3,5 мкм, 0,8 Ом/см; – изолирующие области (4) 4 мкм, 10 Ом/кв.; – контактные коллекторные области (5) 3 мкм, 6 Ом/кв.; – контактные области базы (6) 0,55 мкм, 90 Ом/кв.; – точно локализованные (самосовмещённые) пассивные области базы (7)

0,4 мкм, 220 Ом/кв.; – активные области (8*) базы (до формирования эмиттера 0,4 мкм, 440 Ом/кв.); – активные области (8) базы (после формирования эмиттера шириной 0,15 мкм); – эмиттерные области (9) 0,35 мкм, 30 Ом/кв. Отечественный конструктивно-технологический базис (КТБ) имел двухслойную систему металлизации. Пассивирующая и защитная плёнка плазмохимического $\text{SiO}_{2\text{ПХ}}$, легированная Р, была однородной и очень красивой.

Всем предприятиям соисполнителям были предоставлены КТБ на профили «С», «Т» и «М». Окончательный выбор был за ними: – их конкретные ИС могли иметь специфические особенности. Ленинградские инженеры из «Светланы» (В.П. Цветов, В.Н. Гладкий), проанализировав свои ИС по быстрдействию, выбрали «М»-профиль, но они стали в дальнейшем разрабатывать и свой вариант «С»-профиля с составной маскирующей плёнкой на основе SiO_2T и Si_3N_4 . В Минском «Интеграле» (В. Болдырев, Ю.И. Савотин) – стали заниматься своим поиском по «Т» профилю, хорошо освоив вариант С – профиля [1]. В Вильнюсе (К. Климашаускас, Ю. Мешкуотис) настойчиво осваивали «С» – профиль, но мне пришлось два дня разбираться с двумя их вариантами, совместно анализируя критичные места. Уезжал я с хорошим настроением и великолепными впечатлениями о дружественной и гостеприимной стране.

ИС серии 500 изготавливались в пластмассовом корпусе ДИП с 16 выводами и с металлическим теплоотражателем (тип К.238.16-2).

ИС серии 100 выпускались в металлокерамическом корпусе (рис. 30а).

ИС серии 700 разрабатывались специально для создания многокристалльных БИС (МБИС) системы «Э» и имели А1 «паучковые» выводы.

В НИР «Илим» [12] и ОКР «Илим-1» [13] были разработаны несколько рабочих вариантов изготовления кристаллов ИС для МБИС.

На рис. 30б приведён мой первый вариант кристалла ИС серии 700 со специальными локальными выводами, сформированными на поверхности кристалла и выступающими вне после химического травления Si в органических растворах. Так как метод оказался довольно сложным, процесс ядовитым, а проектирование разводки трудоёмким, – этот вариант был отложен до лучших времен. На рис. 30в приведён второй вариант многокристалльной сборки (МКС) или модуля (МКМ) с выводами на подложке из Si и с локальными отверстиями для размещения кристаллов ИС. Этот вариант тоже оказался довольно трудоёмким.

Третий вариант (рис. 30г), разработанный нач. отдела

К.И. Худяковым, имел выводную Al рамку на полиимидной основе. Этот вариант был успешно внедрён в производство. Технологию травления полиимида отработал исключительно добросовестный Лев Белов. В работе также отличились С.С. Дольников, А.Я. Сафронов, И.П. Васильев, В.Е. Лебедев, Л.С. Одинокова, Т.П. Гоманькова, З.Н. Куликова, Т. Никитина. Через много лет первый и второй варианты были востребованы в ППИ НЦ.

Детально исследовались процессы по всему циклу изготовления ИС. К этим работам привлекались как сотрудники других подразделений НИИМЭ, так и специалисты других институтов: – Бочкин О.И. – резка, шлифовка, полировка Si и Si*, – Н.И. Лабутин, В.Г. Пошин – электронно-микроскопическое исследование образцов и дефектов; В.А. Марасанов – исследование распределений примесей в тонких эпитаксиальных структурах; В.В. Мартынов, Н.О. Гончаренко – исследование процессов фотолитографии; В.Я. Кремлев, К.Ф. Ходжаев – исследование ТС; А.Г. Петрова, А.В. Раков – исследование распределений концентрации Р в плёнках SiO_{2п} и их оптических характеристик; Е.С. Любимов, Е.Н. Любушкин, Г.Ф. Краснова, Р.Н. Круглов – исследование дефектов и селективных процессов эпитаксии.

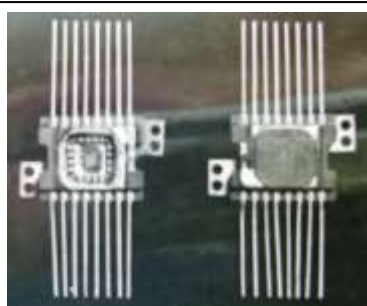


Рис.30,а. Металлокерамический корпус для ИС серии 100.



Рис.30,б. Кристалл серии 700 с локальными выступающими выводами металла.



Рис.30,в. Многокристалльная сборка (МКС) на подложке из Si с локальными отверстиями.

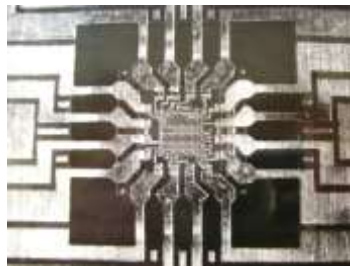


Рис.30,г. Выводная Al-рамка на полиимидной основе - "Паучковые выводы."

“паучковыми” выводами. Он был признан наиболее **успешным** и

От МИЭТ принимали активное участие Орликовский А.А. – будущий Академик РАН, Ю.П. Родионов, Ю.А. Парменов, А.В. Сквиря – исследование АЗУ и ОЗУ; О.И. Лапшинов (аспирант МИЭТ), О.И. Маврин – исследование процессов диффузии As из гомогенных источников. Очень талантливый и трудолюбивый Скрипко Юрий Григорьевич (из г. Донецк, окончивший с отличием МГУ) проводил моделирование и исследование процессов ионного легирования. Б.Г. Суходаев (НИИТМ), А.Г. Белугин, А.В. Каукин – разработку плазмохимических процессов и оборудования; В.И. Хрусталеv, В.И. Мишачев, М.М. Пермяков, Н.И. Винокуров – исследование критичных процессов напыления и травления.

На рис. 3а-к приведены микрофотографии кристаллов ИС для серий 100, 500 и 700. Схемы изготавливались и поставлялись заказчику по НИР «Ингредиент-3» – 1971 г. [9], ОКР «Имитатор-1» – 1972 г. [10], ОКР «Имитатор-ДИП» – 1973 г. [11], НИР «Илим» – 1972 г. [12], ОКР «Илим-1» – 1973 г. [13], ОКР «Имитатор-2» – 1973 г. [14], НИР «Имитатор-3» – 1973 г. [15], НИР «Имитатор-Т» – 1973 г. [16], ОКР «Имитатор-1Д» – 1974 г. [17], ОКР «Имитатор-2Д» – 1974 г. [18], Статья по АЗУ – 1974 г. [19].

Гл. конструктором ИС ОЗУ (НИР «Импровизация» – 1971 г., ОКР «Импровизация-1» – 1972г.) был С.И. Назаров. Заместителями Главного конструктора по основным НИОКР были: – по схемотехнике В.Г. Немудров, Д.А. Чутуев, Г.Э. Широ; – по технологии В.В. Лебедев, – по измерениям Е.С. Минин.

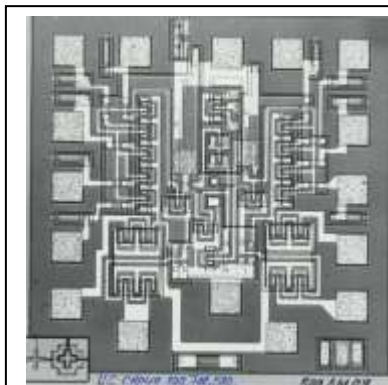


Рис.31,а – ИС 500ЛМ09. Строенный логический элемент (ЛЭ) ИЛИ/ИЛИ-НЕ на 4 и 5 входов:
 $t_{\text{зр}} = 2 \text{ нс}$, $P=73 \text{ мВт}$, $N=38 \text{ шт.}$

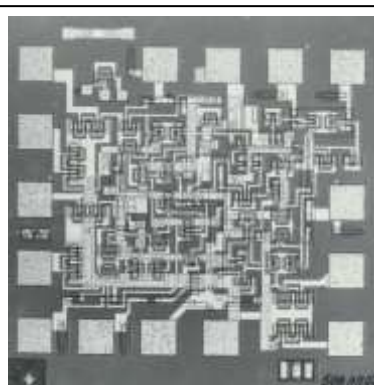


Рис.31,б – ИС 500ЛП07. Строенный ЛЭ "исключение ЛИ/исключение ИЛИ-НЕ"
 $t_{\text{зр}} = 2,1 \text{ нс}$, $P=146 \text{ мВт}$, $N=60 \text{ шт.}$

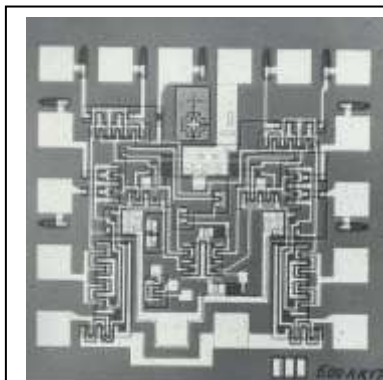


Рис.31,в – ИС 500 ЛМ17 - двойной ЛЭ ИЛИ-И/ИЛИ-И-НЕ на 2 и 3 входа: $t_{зр} = 2,3$ нс, $P=135$ мВт. $N=50$ шт.



Рис.31,г – ИС РУ 401. ЗУ с произвольной выборкой: 16 разрядов. $t_{сч} = t_{ап} = 5$ нс, $P=22,5$ мВт/бит. $N=148$ шт. 2Ме.

Ис особенно важно, – в очень сжатые сроки, под неусыпным контролем вышестоящих органов и очень успешно до лета 1975 г. Начальнику цеха Еремееву Михаилу Петровичу и его сотрудникам Лидии Зайченко, Валерию Бычевскому и Альберту Воробьеву удалось быстро и нормально организовать новую работу. Для ИС различной сложности коэффициент выхода годных составил от 15 до 30 процентов. Это был явный успех для начала. А затем начались события явно детективные. Настала и моя очередь делать ошибки. Возвратившись из отпуска, я был ошарашен известием, что процент выхода годных на всех схемах упал до катастрофической величины. Резко возросли как токи утечки переходов, так и число полностью закороченных транзисторных структур.

И вот внезапно оказалось, что мы все, по выражению Ю.В. Андропова, – живём “в реальных условиях суровой действительности”.

Кто-то, якобы из Минского завода «Интеграл», куда мы успешно внедрили нашу технологию, подлил масла в огонь, поведав главному инженеру А.Р. Назарьяну новость, что у них также были большие токи утечки и они перешли на свой вариант технологии с более глубокими диффузионными слоями и с термическим диоксидом кремния, выбросив пиролитический.

Как только я появился на работе, Директор тут же вызвал меня на ковер:

- Ты знаешь, что у тебя творится на участке?
- Твою технологию на сверхтонких слоях в Минске уже выбросили!
- *Впервые слышу – сделал я удивленные глаза.*
- Заморочил всем мозги своими сверхтонкими структурами.
- Твои **муд-**рецы на участке не могут разобраться. Мне каждую неделю звонят из ЦК, – в жёсткой форме спрашивают, – когда будут поставки? Мне что прикажешь? Что будешь сам делать?

– Вы должны заставить директора завода отремонтировать пиролитическую установку. Цеховики сами перешли на плазмохимический окисел, не поставив никого в известность, – выпалил я.

– Луканов! В этом кабинете я решаю, кто и что должен делать.

– Я выгоню с работы и тебя, и директора завода, если вы не исправите быстро положение. Назначена большая комиссия, – был ответ Валиева.

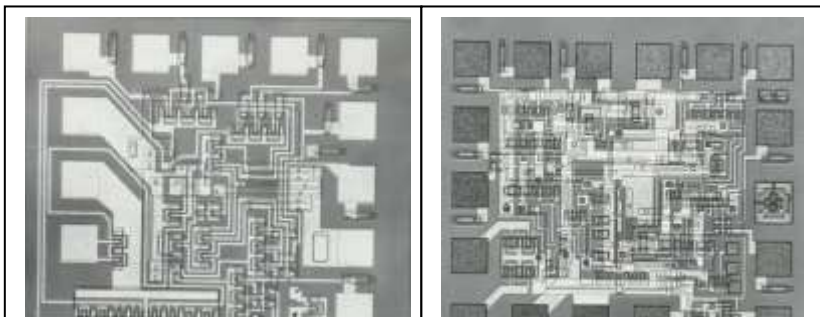
По дороге вспомнил напутствие А.В. Пивоварова. В состав комиссии, думал я, распаяя себя словами директора, войдут представители от КГБ, ЦК, МЭП, ВП и “Интеграла”. Вот будет дело!

Только за дверью сообразил (“лестничная дипломатия”), что сразу при входе надо было сказать, что с утра говорил по телефону с Ю.И. Савотиным из Минска. Тот подтвердил, что ИМС по нашему варианту идут успешно. Легко быть умным задним числом.

Очень толковый и требовательный представитель Военной приёмки А.С. Комаров, – куратор наших разработок в НИИМЭ, – рассказал о поездке комиссии в Минский «Интеграл»:

– Нам показали схемы серии 500, находящиеся на складе и изготовленные по технологии, полученной из НИИМЭ. По изменённой технологии «Интеграла» проводилась пробная партия с более глубокими диффузионными слоями и с термическим диоксидом кремния, но у неё были большие токи утечки. Показали цех, где работали 4 установки пиролитического осаждения диоксида кремния.

Комиссии стало всё ясно, и я получил возможность продолжать работать.



Так удачно подброшенная информация сработала против нас.

События подробно описаны в статье [1]. «Необходимо было быстро выяснить причины брака в цехе и устранить их. Однако это оказалось не простой задачей. Пришлось мне самому становиться следопытом и развязывать узел. Уйти от ошибок не удалось и цеху 04. Нововведения подвели их.

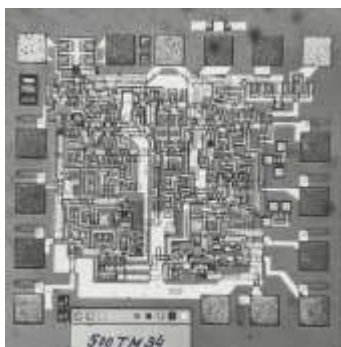


Рис. 31,ж – ИС 500TM34 -
сдвоен. синхронный 2-х вход.
триггер-защелка: $t_{зр} = 3,5$ нс,
 $P=186$ мВт. $N=120$ шт.
Двухслойная система метал-
лизации-2Ме.

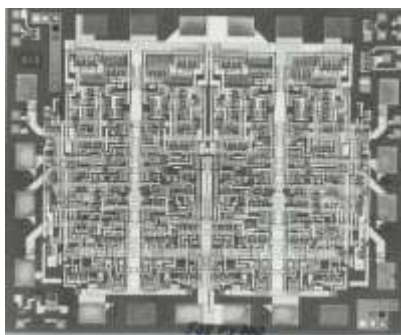
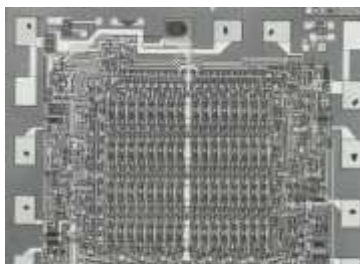
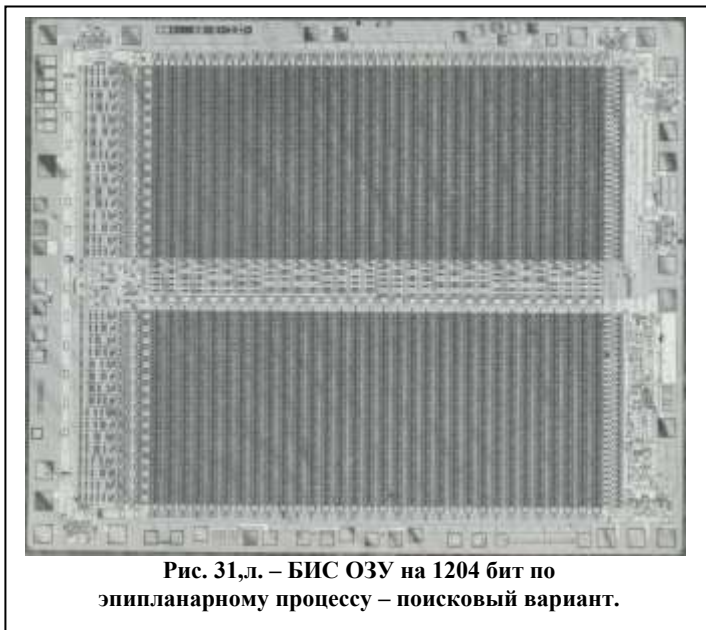


Рис. 31,з – ИС 500PY402.
ИС ассоциативного ЗУ на 4 бит:
 $t_{зр}=2$ нс, $t_{поиск}=4$ нс, $t_{зап}=6$ нс,
 $P=25$ мВт. $N=260$ шт.
Двухслойная система металлиза-
ции-2Ме.





В конце концов, выяснилось, что помимо замены

пиролитического окисла на плазмохимический, были и другие нарушения. На участке фотолитографии была введена новая система оплаты по результатам труда и система жёсткого контроля за уходом размеров. И технологи стали так задубливать фоторезист, что его приходилось удалять в горячем растворе аммиака. При этом, естественно, кремний стал травиться в диффузионных областях базы по дислокациям, что приводило к, невидимым в обычном микроскопе, ямкам травления. Диффузия фосфора, естественно, копировала профиль поверхности и приводила к появлению диффузионных трубок, которые и давали либо токи утечки, либо короткие замыкания. Ситуация осложнялась тем, что и на диффузии бора и фосфора уже действовала та же премиальная система. Малый разброс параметров при большой групповой обработке пластин достигался за счёт ухищрений цеховых технологов: – пошли традиционным путём увеличения концентрации диффузанта выше допустимой нормы. Последнее приводило к неконтролируемому введению дислокаций. Н.И. Лабутин, – нач. лаборатории микроанализа, – сделал прекрасные микрофотографии этих дефектов с помощью электронного микроскопа, но они никого уже не интересовали». Аромат того времени частично описан в книге [28].

Главный инженер Назарьян применил свой излюбленный метод выправления ситуации, – были направлены новые люди, которые занялись поисками и апробациями своих предложений и, естественно, ещё больше запутали ситуацию. Иметь желание – это хорошо, но надо ещё и уметь делать ИС на сверхтонких слоях. Зам. гл. инженера В. Контарев и гл. технолог завода А. Просий самоотверженно бросились в пучину событий. На одном из совещаний в своём кабинете Просий зачитал на своём календаре: «... Назарьян подчеркнул, что никому из отдела 22 не верить, – прорабатывать свои варианты».

Колесо закрутилось... Месяца через два мне удалось выправить ситуацию и.... *“вернуть всё на круги своя”*.

Но борьба с ветряными мельницами не прошла бесследно. “Наступил момент истины. Надо было решать: либо продолжать копирование и внедрение зарубежных аналогов и ждать присуждения очередных Правительственных наград за трудовые подвиги, либо идти по пути творческого поиска. И я выбрал последний путь – пришёл холодным летом 1975 г. к К.А. Валиеву– заведующему кафедрой ИПС МИЭТ. Так закончился второй период, когда «Соединенным Штатам Америки был брошен серьёзный вызов» [1].

В 1977 году ушёл из НИИМЭ работать в РАН К.А. Валиев.

Прошло несколько лет, – и 14.02.1979 г. руководитель п/я В-2892 и п/я М-5079 А.Р. Назарьян и Гл. инженер п/я М-5079 В. Горнев (на основании 17 Актов о внедрении ИС серий К138, 100, 500 и 700 и новых

процессов) подписали Н. Луканову Акт №18 о годовом экономическом эффекте от внедрения результатов научных исследований [32]. Список НИОКР и всех опубликованных статей был заверен Учёным секретарем НИИМЭ и скреплён гербовой печатью.

Работа на кафедре была связана с продолжением поисков по созданию УТС, способов исследования характеристических параметров ТС, методов точной локализации субмикронных элементов, развитию принципов целенаправленного формо- и структурообразования сложных функциональных устройств, реализуемых с применением различных нелиитографических – косвенных методов для создания элементов ИС с субмикронными размерами в плане. В 1988 г. я выиграл Всесоюзный конкурс по микроэлектронике. Положительные отзывы на реферат дали академик РАН К.А. Валиев и профессор С.С. Янушонис.

На рис. 32а дана (из реферата) одна из конструкций СВЧ УТС для УБИС, самоформируемых по нашему “эпипланарному” процессу.

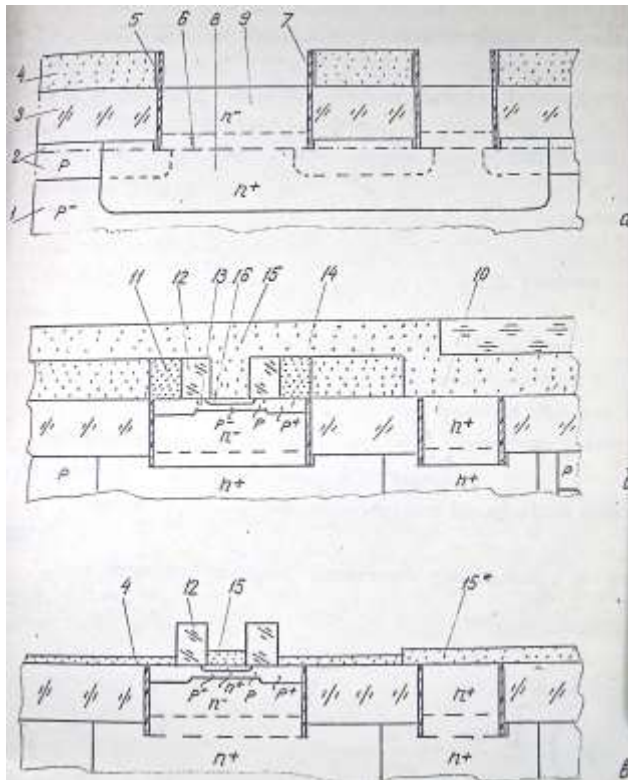


Рис. 32а. Конструкция эпиланарных транзисторов для УБИС.

Конкурсные работы докладывались в Сан-Франциско (США). Они вызвали интерес специалистов. Особенно, псевдо-литографические методы (ПЛМ) создания элементов с субмикронными размерами в плане. Простейшие из них связаны с формированием наномасок на боковой поверхности различных временных жертвенных слоёв. В статье по аванпроекту 1991 г. [31, стр. 53, 54-55] методы самосовмещения, самоформирования и ПЛМ, позволяющие преодолевать ограничения современной литографии, специально рекламно выделялись (рис. 32б) как “САМОФОРМИРУЕМЫЕ СУБМИКРОННЫЕ СТРУКТУРЫ ОЧЕНЬ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СБИС, ПЕРЕКРЫВАЮЩИЕ ПРЕДЕЛЫ СОВРЕМЕННОЙ ЛИТОГРАФИИ”.



Рис. 32б. Перспективный проект ППИ НПО «Научный Центр».

Но началась перестройка. Внедрение проекта в НИИМЭ «тихо» сворачивалось [30]. На этом завершился третий период моей творческой деятельности, – «публичного» соревнования со специалистами США.

Фирма «Intel» серьёзно занялась псевдо-литографическими – косвенными методами нанолитографии и по публикациям с 1996 года добилась больших успехов

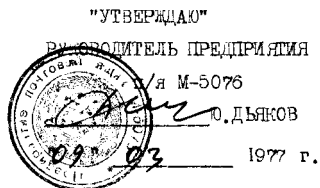
при изготовлении нано-ТС.

Четвёртый период работы с 1992 года я начал в НПК «Технологический центр» МИЭТ, где также продолжил своё увлекательное путешествие по лабиринтам микрорезистивных троп, успешно начатое ещё в лаб. №23 НИИМЭ при разработке нетрадиционных конструкций и технологий ИМС с применением новых принципов точной локализации. Директор государственного Научного центра РФ НПК «Технологический центр» МИЭТ Александр Николаевич Сауров, выпускник кафедры ФТИМС, сам горячий сторонник и активный разработчик методов самоформирования и самосовмещения, сумел организовать в новых тяжёлых для страны условиях необходимую базу для дальнейшего развития этого перспективного направления. Не только смог организовать, но и сам внёс интересные решения, нашедшие повторение в мировой практике. Например, метод создания «степпланарных» ТС с самосовмещённым коллекторным контактом непосредственно к скрытым слоям. Метод применяется в настоящее время в зарубежной практике для формирования микроволновых ТС с селективной эпитаксиальной базой на основе Si-Ge-B-C.

Коротко о судьбе отдела №22 НИИМЭ. После меня последовательно тянули «тяжкий» жребий начальника Отдела 22 сначала В.В. Лебедев, затем С.И. Назаров и, наконец, В.Н. Кокин. Они должны были разрабатывать и поставлять новые типы ИС и матричные БИС для системы «Эльбрус-2». И одновременно им было поручено срочно копировать БИС и СБИС ОЗУ по новым зарубежным изопланарным технологиям (Изопланар, Изопланар-2, Изопланар-Z). Последняя структура имела узкие пристеночные эмиттерные области и явилась своеобразным камнем преткновения – *оселком* для технологов. У них было очень большое искушение внедрить свои оригинальные решения, а это, как правило, быстро не удавалось. А спрос был очень жестким, – Административная Система умела заставить выполнять свои решения. Руководство института, естественно, стало привлекать разработчиков из других отделов. Моему же сотруднику, – отличному специалисту по измерениям, – Виктору Попову, возглавившему этот большой комплекс работ и не отягощённому технологическими тонкостями, – в итоге удалось успешно выполнить и это задание.

Разработка эпиланарного процесса продолжалась с переменным успехом. Все ожидали чуда. «Время, однако, показало, что из этого ничего не получилось бы. К сожалению, героические попытки А.А. Щербинина, Е.С. Любимова и Ю.Д. Чистякова вживить нашу отечественную эпиланарную технологию в отечественное

производство кончились печально из-за амбиций отдельных товарищей» [1]. Коллектив с огромным упорством пытался сразу реализовать и внедрить очень сложные БИС ОЗУ, не пройдя соответствующую школу разработок при использовании более простых ИС с хорошо изученными тестовыми структурами. И ещё очень важный момент. Не было требуемой поддержки этой темы и со стороны некоторых заместителей руководителя института.



А К Т № 7

Мы, нижеподписавшиеся, представители предприятия п/я М-5076 - главный технолог Просий А.Д., главный конструктор Федоров Г.Д., начальник цеха 04 Еремеев М.П. и главный конструктор разработки микросхем серии 500 Луканов Н.М., составили настоящий акт в том, что разработанные под руководством Луканова Н.М. и при его непосредственном участии в разработке конструкции и технологии 10 типов микросхем серии 500 по темам: НИР "Имитатор"; ОКР "Имитатор-1Д", ОКР "Имитатор-2Д" освоены в 1975-76 гг. на предприятии п/я М-5076 и в настоящее время выпускаются серийно на этом же предприятии.

Разработанные микросхемы серии 500 представляют собой сверхбыстродействующие схемы на переключателях тока (ЭСЛ-типа) с быстродействием 2-3 нс и по своим электрическим параметрам соответствуют лучшим зарубежным аналогам микросхем серии MECL-10,000 фирмы "Motorola".

Микросхемы серии 500 предназначены для сверхбыстродействующих систем автоматики, контрольно-измерительной аппаратуры, устройстве передачи данных и нового класса высокопроизводительных ЭВМ III поколения.

Главный технолог п/я М-5076 *А.Д. Просий* А. Просий
 Главный конструктор п/я М-5076 *Г.Д. Федоров* Г. Федоров
 Начальник цеха 04 п/я М-5076 *М.П. Еремеев* М. Еремеев
 Главный конструктор разработки микросхем серии 500 *Н.М. Луканов* Н. Луканов

Рис. 32в. Акт о внедрении ИС серии 500.

И наконец, автор приглашает читателя прочитать ещё Акт № 7 (рис. 32в) о внедрении ИС серии 500, подписанный директором завода Ю.Н. Дьяковым, внёсшим свой большой вклад в *общее дело*.

Менялись директора, главные инженеры и их замы. Им доставалось в наследство очень сложное и хлопотное хозяйство. И они с текущими

делами в общем справлялись. Министр В.Г. Колесников жёстко и целенаправленно проявлял свою волю.

В итоге, – первые сверхбыстродействующие ИС, МБИС и СБИС ОЗУ для системы «Эльбрус-2» нашли своего
Государственной Важности Заказчика, а надёжные ИС для противоракетного щита России были сделаны и организован их серийный выпуск.

А время шло вперёд. В НПК ТЦ МИЭТ [31-36] и в НИИМЭ снова загорелся интерес к эпиланарным отечественным структурам на основе УТС и систем Si*(P), Si*(As), SiGe. В НИИМЭ – исследование и моделирование проводили Николай Алексеевич Шелепин [П1.10], Геннадий Яковлевич Красников и А.П. Нечипоренко [П1.11], К.Г.-М Шварц и др. сотрудники НИИМЭ.

***Посеянные семена уже начали давать всходы и на Российской Земле Зеленоградской.
 Профили легирования «М», «Т», «С», «У» живы и работают.***

Заключение

История развития советской микроэлектроники складывалась из тысяч и тысяч отдельных событий, за которыми стояли конкретные люди и коллективы, обеспечившие ей достойное место в мировом разделении труда. Когда это разделение касалось военной техники, – оно способствовало паритету сил и сохранению мира. Большой вклад в этот процесс внёс коллектив лаборатории №23, а затем отдела №22 НИИМЭ, которым в сжатые сроки с 1966 по 1975 гг. выпала честь стать первопроходцами в деле создания и внедрения первых отечественных конструктивно-технологических базисов для сверхбыстродействующих ИС ЭСЛ типа серий K138, 100, 500 и 700 в НИИМЭ и на заводе «Микрон», а затем распространить свой положительный опыт на четыре предприятия МЭП. Интегральные микросхемы этих серий предназначались для высокопроизводительных моделей ЕС ЭВМ (“Ряд-2”), различных систем автоматики, работающих в реальном масштабе времени, противоракетной системы “Эльбрус-2”, а также специализированных систем обработки сверхбольших массивов информации, получаемых из космических объектов.

В 1966—1967 гг. были проведены пионерские работы, связанные с созданием ультратонкослойных транзисторных структур (УТС),

названных алигаторными, известных теперь как нано-ТС по вертикали. Работы ждали своего времени, чтобы стать основой для ультрабыстродействующих ИС – элементной базы гигабитных систем обработки информации.

Технологии на тонких, сверхтонких и ультратонких профилях с 1968 г. разрабатывались впервые с применением пассивных эмиттерных областей на основе поликремния Si^* , легированного Р в процессе эпитаксиального осаждения и с применением маскирующих слоев на основе пиролитического диоксида кремния, осаждаемого в вакууме.

В период с 1969 по 1970 гг. были созданы:

- полуавтоматические диффузионные системы для проведения прецизионных процессов диффузии В и Р с применением жидких источников диффузанта;
- методики исследования ультратонких физических структур;
- процессы диффузии As в вакууме с отжигом в водороде;
- планарная технология на “мелких” слоях и сверхбыстродействующие ИС (12 типов) ЭСЛ типа серии K138 для ЭВМ «Ряд-2» с временем задержки распространения сигнала $t_{зр} = 1,9$ нс на логический вентиль;
- “эпипланарные” транзисторные структуры с селективной эпитаксией и с боковой диэлектрической изоляцией на “сверхтонких” слоях и образцы ИС ЭСЛ типа с рекордным значением $t_{зр} = 0,5$ нс;
- групповые процессы диффузии В, Р и Au.

В период с 1970 по 1975 гг. разработаны и внедрены на сверхтонких слоях с точной локализацией элементов 10 типов сверхбыстродействующих ИС ЭСЛ типа серий 100, 500, 700 (в различных корпусах) с $t_{зр} = 1,5$ нс на базовый логический вентиль для систем «Эльбрус-2» и “Ряд-2”. Шесть типов ИС (по топологии идентичной MC10000) были показаны специалистам корпорации «Motorolla» США уже в 1970 г. По ряду работ были достигнуты высокие результаты, опережающие зарубежные поисковые исследования. Разработка ультрабыстродействующих ИС – элементной базы гигабитных систем обработки информации на УТС остаётся перспективным направлением и сегодня, естественно, на новом уровне понимания процессов точной локализации, целенаправленного формо- и структурообразования, самосовмещения и самоформирования, самосборки и самоорганизации.

Вспоминая работу в НИИМЭ, и как бы, охватывая сделанное человеческим разумом и руками, К.А. Валиев так подвёл итог своей деятельности, а заодно, и деятельности предприятия:

«Нас вдохновляло чувство того, что мы участвуем в работе национального масштаба, имеющей для огромной державы СССР сравнимое, например, с ядерной программой значение. Наши прямые

связи простирались по всей территории СССР, на наших ИС строилась важная для страны аппаратура. Причастность к таким программам играет огромную вдохновляющую роль. Я счастлив, что мне удалось участвовать в такой программной работе, как создание микроэлектроники в СССР».

Свою причастность к решению технических и научных проблем века и востребованность для страны чувствовали и многие из тех соратников, кто непосредственно работал в НИИМЭ с талантливым руководителем предприятия и организатором эффективной научной школы Камилем Ахметовичем Валиевым [30].

P.S. Искренне благодарю А.Н. Саурова, В.Д. Вернера, А.С. Басаева, П.П. Мальцева, В.Г. Сницар, В.В. Коняхина, А.Н. Денисова, Н.А. Шелепина, Б.М. Малашевича, Г.Г. Казеннова, К.Г.-М. Шварц, А.А. Руденко, О.И. Бочкина, М.И. Лукасевича, Е.С. Горнева и др. за тот творческий импульс, который они придали мне, проявив своеобразный интерес к моей первой статье [1].

Литература

1. Луканов Н.М. Некоторые малоизвестные моменты из истории отдела 22 НИИМЭ // Электронная техника. Сер. 3, Микроэлектроника. Выпуск 1(152), – 1998. – с. 49-57.
2. НИР “Ингредиент”. Разработка режимов получения воспроизводимых тонких диффузионных слоев с низкой концентрацией примеси // –М.: – НИИМЭ, –1967. – 228 с. Гл. конструктор – Луканов Н.М.
3. НИР “Ингредиент-1”. Разработка режимов получения воспроизводимых и однородных диффузионных структур для сложных функциональных устройств // – М.: – НИИМЭ. – март 1969. – 209 с. Гл. конструктор – Луканов Н.М.
4. ОКР “Процесс-2”, часть 1. Разработка базового технологического процесса производства ИТС для создания высокочастотных линейных интегральных схем, «Высокочастотный каскадный усилитель» // – М.: – (НИИМЭ). –1970. – 207 с. Гл. конструктор – Луканов Н.М.
5. ОКР “Процесс-2”, часть 2. Групповые технологические процессы производства ИТС // – М.: – НИИМЭ. – 1970. – 185 с. Гл. конструктор – Луканов Н.М.
6. НИР “Искра”. Разработка логических элементов на токовых ключах с временем задержки 2-3 нсек для высокопроизводительных ЭВМ // – М.:

НИИМЭ. – 1970. – 90 с. Гл. конструктор – Луканов Н.М.

7. ОКР “Искра-1”. Разработка серии логических элементов на токовых ключах с типовым временем задержки сигнала 2-3 нсек // – М.:– НИИМЭ. –1971. – 226 с. Гл. конструктор – Луканов Н.М.

8. Луканов Н.М., Назаров Н.С., Струков В.Н., Лебедев В.В., Немудров В.Г., Минин Е.С. Быстродействующие интегральные схемы на токовых ключах // Электронная промышлен. – М.: –1972. – №7. – с. 56 – 59.

9. НИР “Ингредиент-3”. Разработка технологии и основного логического элемента типа ЭСЛ на основе тонких эпитаксиальных слоев 3-5 мкм // – М.: – НИИМЭ. –1971. –367 с. Гл. конструктор – Луканов Н.М.

10. ОКР “Имитатор-1”. Разработка серии логических элементов малой степени интеграции на токовых ключах для системы “Э” // – М.:– НИИМЭ. –1972. – 112 с. Гл. конструктор – Луканов Н.М.

11. ОКР “Имитатор-ДИП”. Разработка серии логических элементов на токовых ключах в корпусе типа К-301 с типовым временем задержки 2-3 нсек // – М.: – НИИМЭ. –1973. – 129 с. Гл. конструктор – Луканов Н.М.

12. НИР “Илим”. Разработка конструкции и технологии изготовления кристаллов ИС, пригодных для сборки в МБИС // – М.:– НИИМЭ. – 1972. – 85 с. Гл. конструктор – Луканов Н.М., зам. Гл. констр. по технологии сборки – Худяков К.И.

13. ОКР “Илим-1”. Разработка серии из 8-ми микросхем в конструктивном исполнении, пригодном для применения в многокристалльных БИС // – М.: – НИИМЭ. –1973. – 100 с. Гл. конструктор – Луканов Н.М., зам. Гл. констр. по технологии сборки – Худяков К.И.

14. ОКР “Имитатор-2”. Разработка микросхем высокой степени интеграции (МС10.130, МС10.134, МС10.121) // – М.: – НИИМЭ. – 1973. – 145 с. Гл. конструктор – Луканов Н.М.

15. НИР “Имитатор-3”. Исследование схмотехнических и технологических особенностей разработки монолитной ИС ассоциативной памяти // – М.: – НИИМЭ. – 973. – 93 с. Гл. конструктор – Лебедев В.В., зам. Гл. констр. по технологии – Луканов Н.М, зам. Гл. констр. по схмотехнике – Чутуев Д.А.

16. НИР “Имитатор-Т”. Исследование и разработка сдвоенного триггера-защелки (аналог элемента МС10.130) // – М.: – НИИМЭ. – 1973. – 79 с. Гл. конструктор – Луканов Н.М.

17. ОКР “Имитатор-1Д”. Разработка ИС серии 500 (схемы 500ЛП07, 500ЛМ09, 500ЛК17, 500РУ401) // – М. – НИИМЭ. –1974. – 137 с. Гл. конструктор – Луканов Н.М.

18. ОКР “Имитатор-2Д”. Разработка ИС серии 500 (схемы 500ЛК21, 500ТМ30, 500ТМ34, 500РУ402) // – М.: – НИИМЭ. – 1974. – 116 с. Гл. конструктор – Луканов Н.М.
19. Лебедев В.В., Луканов Н.М., Назаров С.И., Орликовский А.А., Холоднова Л.П., Чутуев Д.О. Быстродействующее АЗУ // – М.: Электронная промышленность. – 1974, – №7, – с. 25—26.
20. Баранов В.Н., Большаков Ю.В., Иванов В.И., Луканов Н.М., Попов В.М., Фомин Г.А., Родионов А.В. Лучистый нагрев в микроэлектронном производстве // Труды конференции по электронной технике. Специальное технологическое оборудование микроэлектроники, вып. 3(29). –М.: – ЦНИИ “Электроника”. –1971. – с. 54—59.
21. Баранов В.Н., Большаков Ю.В., Иванов В.И., Луканов Н.М., Попов В.М., Фомин Г.А., Родионов В.В. Лучистый нагрев в микроэлектронном производстве. Четвертая внутривузовская научно-техническая конференция по проблемам микроэлектроники. –МИЭТ. 2—4 февраля 1972.
22. Н.М. Луканов, В.В. Лебедев, Петрова А.Г. Исследование легированных фосфором тонких пленок двуокиси кремния, полученных в процессе низкотемпературного разложения тетраэтоксисилана // Электронная техника. Серия VI. Микроэлектроника, вып. 4.(25). –1970, –с. 73—75.
23. Луканов Н.М., Лебедев В.В., Сулимин А.Д., Яковенко В.Г. Применение плазмохимических пленок двуокиси кремния в технологии изготовления сверхбыстродействующих ИС на переключателях тока // – М.: Электронная промышленность. – 1974, – №1, – с. 59—65.
24. Сулимин А.Д., Луканов Н.М., Осташкин Л.П., Неустроев С.А., Яковенко В.Г. Исследование некоторых свойств системы Si – SiO₂, получаемой плазмохимическим осаждением двуокиси кремния // Физика и химия обработки материалов. – М.: Академия Наук СССР. – 1975, – №2, с. 57—60.
25. Ильчинский Е.С., Луканов Н.М., Орликовский А.А. Контроль импульсных параметров полупроводниковых СОЗУ // – М.: Электронная промышленность. – 1975, – №4, – с. 50—55.
26. Луканов Н.М., Сулимин А.Д., Неустроев С.А., Яковенко В.Г., Лебедев В.В., Морозова Л.С., Джабраилов М.И. Применение плазмохимических пленок двуокиси кремния для создания многослойных межсоединений интегральных схем // – М.: МИЭТ. Сборник научных трудов по проблемам микроэлектроники. – 1975, с. 133—138., а также с. 148—152.
27. Винокурова Г.М., Луканов Н.М., Неустроев С.А., Сулимин А.Д., Яковенко В.Г. “Исследование индуцированного заряда при

плазмохимическом осаждении пленок двуокиси кремния” – М.: – Электронная техника, сер. 3 Микроэлектроника, –1975, – вып. 5, – с. 80—82.

28. Книга. “ЗЕЛЕНАЯ ВЕТВЬ МОСКВЫ. ЗЕЛЕНОГРАД ДО 2003

ГОДА”. Очерки, воспоминания, размышления, зарисовки // Мы будем жить легендой молодою: Аромат того времени, с. 103—109;

Казеннов Г.Г., с. 90—91; Малин Б.В., с. 64—66; Гаряинов С.А. с. 81—83 // – М.: – 2008. ООО «Зеленоградский Полиграфический центр», 124460, Москва, Зеленоград. – 2008.

29. Книги Т.1., Т.2. История Отечественной Электроники (ИОЭ) // – М.: – 2011. –Т.1. – Гл. 5. Разработка ЭСЛ ИС, – с. 552. // – М.: – 2012. – Т.2. – 588 с. Москва. Издательский дом Столичная энциклопедия. Под редак. директ. Департамента радиоэлектрон. Промышл. Минпромторга России А.С. Якунина.

30. Книга. Научное издание РАН: АКАДЕМИК К.А. ВАЛИЕВ В ВОСПОМИНАНИЯХ // Статья: Луканов Н.М. Создание первых сверхбыстродействующих ИС ЭСЛ для ЭВМ «Ряд-2» и «Эльбрус-2» – противоракетного щита России. – с. 122—128. Изд-во «Наука». – М.: – 2015.

31. Lukanov N.M., Mochalov M.A., Balashov S.M., Dyatchenko V.N., Skvira A.V. Bipolar VLSI based on self-aligned transistor structures // Electronic Engineerin. Series Microelectronics. Issue 1(1). News from Soviet “Silicon Valley”. – М.: –1991. – p.p. 53, 54—55. Статья издана в НПО «НЦ» по материалам Всесоюзного конкурсного проекта 1988 г. Луканова Н.М.

32. Луканов Н.М. Название темы: “Исследование и разработка конструктивно-технологических базисов изготовления сверхбыстродействующих и ультрабыстродействующих интегральных микросхем для перспективных поколений СУПЕР-ЭВМ и систем автоматики”. – М.: МИЭТ. – 1996. Диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степени доктора технических наук. Хранитель ГПНТБ.

33. Вернер В.Д., Луканов Н.М., Сауров А.Н., Метельков П.В. Оптимизация СВЧ самосовмещенных транзисторных структур на чистом кремнии и малошумящего широкополосного усилителя для радиопередающих ИС с элементами МЭМС (Части 1-3) // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – М.: ФГУП «ВИМИ». –2011. Часть 1. – №1. – с. 78—84; Часть 2. – №2. – с. 20—27; Часть 3. – №3. – с. 11—20.

34. Вернер В.Д., Луканов Н.М., Сауров А.Н. Принципы конструирования биполярных СВЧ структур с предельно узкими эмиттерными областями // Нано- и Микросистемная техника. –

- М.: – 2011. № 12(137). – с. 13—16.
35. Вернер В.Д., Луканов Н.М., Сауров А.Н. СВЧ самосовмещенные структуры с прямыми и обращенными ультратонкими эмиттерными областями // – М.: –Изд. вузов. Электроника. – 2013. – № 3(101). – с. 21—27.
 36. Вернер В.Д., Луканов Н.М., Сауров А.Н. Конструктивно-технологический базис на основе полностью самосовмещенных структур для терагерцовых БИС // – М.: – Изв. вузов. Электроника. – 2015. – Том 20. – № 1. – с. 23—30.
 37. Луканов Н.М. Интегральные микросхемы и функциональные узлы // – М.: – 1990. – ВИНТИ. – ИТОГИ НАУКИ И ТЕХНИКИ. Научный редактор к.т.н. В.А. Марасанов. Главный редактор д.т.н. Ю.Н. Дьяков. – с. 3—32.
 38. Луканов Н.М. От Учебно научной лаборатории (УНЛ) через Учебно-производственную лабораторию (УПЛ) к НПК «Технологический центр» МИЭТ // статья в электронном виде содержит названия НИР, ОКР и статей; передана в архив ОИМ НПК ТЦ, Отв. Коляхин В.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ №1. – Дополнительная литература – глазами участников событий

- П1.1. Книга. В.М. Пролейко. О значении электроники. Военный аспект // Очерки истории российской электроники. Вып.1. “60 лет отечественному транзистору”. – М.: Техносфера, – 2009. – 336 с. (Гл. 25, – с. 316—328).
- П1.2. Книга. А.А. Шокин. Министр невероятной промышленности СССР. Страницы биографии // – М.: Техносфера, – 2007. – 456 с. (Гл. 18, с. 345).
- П1.3. Книга. НИИМЭ – “Микрон”, 35 лет. События. Люди. Г.Г. Казеннов. Глазами участника – (с. 109—117, выдержка взята со стр. 113) // – М.: “Микрон-принт”, – 1999., – 280 с.
- П1.4. В.С. Бурцев. Об основателях микроэлектроники в Советском Союзе – ложных и истинных. Воспоминания очевидца // Журнал «Электроника: НТБ», – №1, – 2002, с. 10-11. В.С. Бурцев. СуперЭВМ в России. История и перспективы // Электроника: Наука, Технология, Бизнес 4/2000, с. 5—9).
- П1.5. Н. Москвина. “40 лет Микрону. Первый Директор”, Газета “Сорок один”. №3, 23/01. – 2004, с. 4.)
- П1.6. Б.М. Малашевич. “Зеленоградский Центр микроэлектроники: создание, расцвет, закат...” // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология,

Бизнес (НТБ). 1/2007, – с. 104—112).

П1.7. А.И. Савин. Предприятия должны владеть интегральной технологией // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ 2/2001, – с. 5—6).

П1.8. Дьяков Ю.Н., Пивоваров А.В., Васенков А.А. Объединению “Научный центр” – 35 лет. Интернет. Виртуальный компьютерный музей.

П1.9. Мартынов В.В. Нужны ли в России мини- и спейсфабы? Отклик на статью «Наноэлектроника уровня 50-100 нм. Техноэкономическая перспектива» // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ 4/2000, – с. 64-67.

П1.10. Шелепин Н.А. Докторская диссертация, –М.: – МИЭТ. – 2001. Отчет НИР Исследование и разработка технологий и критических технологических процессов создания биполярных и смешанных БИС нового поколения шифр: “Линейка-2”. –М.: – МИЭТ. – НПК ТЦ. – 2001. Научный руководитель работы, к.т.н. Н.А. Шелепин. Ответственный исполнитель НИР, в.н.с. НПК ТЦ, д.т.н. Н.М. Луканов.

П1.11. Красников Г.Я., Нечипоренко А.П. 1) Тезисы доклада P1-16. Преимущества локальной автоэпитаксии Si при формировании боковой диэлектрической изоляции микросхем. 2) Тезисы доклада P1-15. Возможности неизотермического режима осаждения Si из готовой фазы $[SiH_4+H_2+AsH_3]$ при формировании «р-п» переходов микросхем // Всероссийская научно-техническая конференция. Микро- и Нано-Электроника. – 2001. Звенигород, пансионат «Липки», 1—5 октября 2001 г.

П1.12. Книга. Семенов С.М., Коровин В.Н. ОАО «НИИМЭ и МИКРОН» 50 лет лидер российской микроэлектронике. Глава 3. Прирастание «Микроном». Из воспоминаний Главных Конструкторов: Контарев В.Я., Кокин А.А., Безбородников Б.А., Валеев А.С., Хрусталев В.А., Горнев Е.С., Лукасевич М.И., Казеннов Г.Г., Луканов Н.М., Красавина Л.З. – с. 56-73. Фото Микросхемы серии 700 для супер ЭВМ «Эльбрус-2» – с. 129 // Международный Объединенный Биографический Центр. – М.: – 2015. – 391 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ №2. – Статьи, подготовленные к опубликованию в специализированных журналах и оригиналы которых хранились в библиотеке НИИМЭ

П2.1. Луканов Н.М. Полуавтоматическая диффузионная установка для проведения диффузии с использованием жидких источников диффузанта // Специальная электроника. Серия VI. Микроэлектроника, вып. 2.(12). –1969. – с. 98-100.

- П2.2. Луканов Н.М., Кокин В.Н., Сладкова В.И. Влияние режимов диффузионного процесса на параметры диффузионных слоев // Специальная электроника. Серия VI. Микроэлектроника, вып. 2.(12). – 1969. – с. 101-106.
- П2.3. Любимов Е.С., Луканов Н.М., Краснова Г.Ф., Небольсин М.В., Сладкова В.И. Некоторые вопросы изготовления кремниевых эпитаксиальных структур с диффузионными скрытыми слоями // Специальная электроника. Серия VI. Микроэлектроника, вып. 2.(12). – 1969. – с. 89—92.
- П2.4. Луканов Н.М., Лебедев В.В., Кокин В.Н., Хорина З.И. Кремниевые интегральные транзисторы на тонких диффузионных слоях // Специальная электроника. Серия VI. Микроэлектроника, вып. 2.(12). – 1969. – с. 93-96.
- П2.5. Луканов Н.М., Кокин В.Н., Лебедев В.В. Формирование интегральных транзисторных структур на тонких диффузионных слоях с применением термически выращенного маскирующего окисла // Специальная электроника. Серия VI. Микроэлектроника, вып. 3.(16). – 1970. – с. 10—16.
- П2.6. Луканов Н.М., Лебедев В.В., Карабанов В.В. Модифицированный метод диффузии фосфора и бора в производстве интегральных схем на тонких диффузионных слоях // Специальная электроника. Серия VI. Микроэлектроника, вып. 2.(20). – 1971. – с. 24—26.
- П2.7. Луканов Н.М., Лебедев В.В. Формирование интегральных сверхбыстродействующих транзисторов с низкоомной базой // Специальная электроника. Серия VI. Микроэлектроника, вып. 2.(20). – 1971. – с. 8—11.
- П2.8. Луканов Н.М., Лебедев В.В., Любимов Е.С., Любушкин Е.Н., Шварц К.-Г.М. и Щербинин А.А. Новая конструкция элементов интегральных схем // Специальная электроника. Серия VI. Микроэлектроника, вып. 1.(19). – 1971. – с. 39—44.
- П2.9. Голубев А.П., Луканов Н.М., Лебедев В.В., Малышев И.В., Семученков Н.В. Влияние параметров транзисторов на частотные характеристики линейных полупроводниковых интегральных схем // Специальная радиоэлектроника, вып. 4. – 1971. – с. 63—65.
- П2.10. Луканов Н.М., Лебедев В.В. Электрические параметры тонкослойных транзисторных структур с низкоомной базой // Специальная электроника. Серия III. Микроэлектроника, вып. 2.(22). – 1972. – с. 66—69.
- П2.11. Луканов Н.М., Лебедев В.В., Любимов Е.С., Марасанов В.А., Мартынов В.В., Шварц К.-Г.М. и Щербинин А.А. Получение эпитаксиально-диффузионных структур с боковой диэлектрической

изоляция // Специальная электроника. Серия III. Микроэлектроника, вып. 2.(22). –1972. – с. 85—88.

П2.12. Луканов Н.М., Любимов Е.С., Кокин В.Н., Манжа Н.М., Пережогин Н.В. Перераспределение мышьяка в скрытых слоях в процессе термообработки в потоке водорода // Специальная электроника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, вып. 1.(23). – 1974. – с. 46—49.

П2.13. Валиев К.А., Луканов Н.М., Небольсин М.В., Беркова Н.М. Высокопроизводительные процессы диффузии фосфора и бора в производстве интегральных схем // Специальная электроника. Серия VI. Микроэлектроника, вып. 3. –1970. – с. 3—9.

П2.14. Баранов В.Н., Большаков Ю.В., Иванов В.И., Луканов Н.М., Попов В.М., Фомин Г.А., Родионов А.В. Лучистый нагрев в микроэлектронном производстве // Труды конференции по электронной технике. Специальное технологическое оборудование микроэлектроники, вып. 3(29). – М.: –ЦНИИ “Электроника”. –1971. – с. 54—59.

П2.15. Баранов В.Н., Большаков Ю.В., Иванов В.И., Луканов Н.М., Попов В.М., Фомин Г.А., Родионов В.В. Лучистый нагрев в микроэлектронном производстве. Четвертая внутривузовская научно-техническая конференция по проблемам микроэлектроники. –МИЭТ. 2—4 февраля 1972.

П2.16. Баранов В.Н., Ефишова З.Е., Иванов В.И., Козлов Н.Ф., Круглов Л.М., Луканов Н.М., Сапронов В.И., Фомин Г.А. Особенности ИК нагрева в процессах диффузии, окисления и вжигания алюминия // Электронная промышленность, – №4. –1974. – с. 85-87.

П2.17. Долгов В.В., Луканов Н.М. Исследование и контроль контактного сопротивления металлизации на компонентах сверхбыстродействующих интегральных схем // Специальная радиоэлектроника, вып. 4. – 1973. – с. 75-77.

П2.18. Луканов Н.М., Сулимин А.Д., Неустроев С.А., Яковенко В.Г., Лебедев В.В., Морозова Л.С., Джабраилов М.И. Применение плазмохимических пленок двуокиси кремния для создания многослойных межсоединений интегральных схем // – М.: МИЭТ. Сборник научных трудов по проблемам микроэлектроники. –1975. – с. 133—138, а также с. 148—152.

П2.19. Луканов Н.М., Яковенко В.Г., Лабутин Н.И., Пошин В.Г., Винокуров Н.И. Вытравливание «окон» в плёнках двуокиси кремния на алюминиевых контактных площадках интегральных схем // Специальная радиоэлектроника, вып. 3. – 1975. – с. 56—58.