

Интеллектуальная САПР «Смекалец»: быстрый и простой синтез СВЧ интегральных схем

А. Калентьев, к. т. н.¹, И. Добуш, к. т. н.², А. Горяинов, к. т. н.³,
А. Сальников, к. т. н.⁴

УДК 621.382 | ВАК 2.2.14

Современные САПР микроэлектроники обретают все больше инструментов на основе искусственного интеллекта. Это позволяет повысить производительность труда и сократить сроки разработки устройств. В данной статье представлена САПР «Смекалец» для синтеза однофункциональных и многофункциональных интегральных схем СВЧ-диапазона, которая автоматически генерирует схемные решения, учитывая при этом особенности технологического процесса. Приведенные результаты измерений изготовленных образцов монолитных интегральных схем СВЧ-диапазона подтверждают работоспособность предложенных подходов.

ВВЕДЕНИЕ

Микроэлектроника для систем связи стремительно развивается. Сотовая связь 5G, Интернет вещей, автомобильные радары – это лишь несколько примеров областей ее применения, увеличивающих спрос на СВЧ-устройства и повышающих требования к ним. Например, трафик мобильного Интернета за последние пять лет вырос в 10 раз и в 2021 году достиг 65 эксабайт в месяц. Быстрое и постоянное развитие этой отрасли происходит благодаря тому, что совершенствуются как технологические процессы, так и методы проектирования устройств.

Основной инструмент разработчика изделий микроэлектроники – системы автоматизированного проектирования (САПР). Они заменили значительную долю ручного труда. Чтобы еще больше повысить производительность процесса проектирования, в САПР все шире применяются методы искусственного интеллекта. Например, компания Synopsys

разработала подход Design Space Optimization, позволяющий автоматически решать разные задачи проектирования СБИС; Siemens EDA (бывшая Mentor Graphics) использует машинное обучение Calibre ML-OPC для коррекции эффекта близости в фотошаблонах, а Cadence AWR создала программу AntSyn для автоматического синтеза антенн.

В данной статье представлена САПР «Смекалец», разрабатываемая компанией 50ohm Technologies. Программное обеспечение ориентировано на автоматический синтез схемотехнических решений и эскизов топологий как монолитных интегральных схем (МИС), к которым относятся маломощные усилители, буферные усилители, усилители мощности, ступенчатые аттенюаторы и фазовращатели, коммутаторы, цифровые драйверы управления, так и многофункциональных интегральных схем (МФИС), которые являются радиосистемой на кристалле (RF Front End, Core Chip).

КОНЦЕПЦИЯ САПР «СМЕКАЛЕЦ»

В САПР «Смекалец» для синтеза интегральных схем СВЧ-диапазона используется новый подход на основе эволюционных вычислений. Множество возможных схем для определенного класса устройств огромно, и за разумное время невозможно проверить их все. Проектировщик выбирает решения на основе своего опыта, но обычно не имеет достаточно времени, чтобы проверить даже небольшое количество

¹ 50ohm Technologies (резидент Фонда «Сколково»), директор, alexey.kalentyev@50ohm.tech.

² 50ohm Technologies (резидент Фонда «Сколково»), руководитель проектов, igor.dobush@50ohm.tech.

³ 50ohm Technologies (резидент Фонда «Сколково»), руководитель отдела разработки, aleksandr.goryainov@50ohm.tech.

⁴ 50ohm Lab ТУСУР, заведующий лабораторией, andrei.salnikov@main.tusur.ru.

подходящих вариантов. Эволюционные алгоритмы имитируют процессы биологической эволюции: решения совершенствуются и конкурируют, пока не появится то, которое удовлетворяет всем поставленным требованиям. Чтобы получать практически значимые схемные решения при заданном технологическом процессе изготовления СВЧ МИС, используется специальный модуль PDK Bridge, который считывает характеристики элементов из коммерческих библиотек стандартных элементов (process design kit, PDK) [1]. Хотя исходный код таких PDK обычно недоступен, характеристики ее элементов могут быть рассчитаны средствами САПР. Модуль экспорта позволяет передать синтезированные решения в коммерческие САПР, обеспечивая широкий охват пользователей и эффективную интеграцию интеллектуального подхода в традиционный процесс проектирования.

Процедура синтеза может быть формализована следующим образом. На входе САПР получает требования к СВЧ интегральной схеме и библиотеку стандартных элементов того технологического процесса, по которому планируется изготовление схемы. На выходе САПР выдает схемное решение и эскиз топологии. Все промежуточные операции выполняются автоматически за счет применения методов искусственного интеллекта.

Преимущества интеллектуальной САПР «Смекалец»:

- **скорость:** синтез занимает от десятков минут до нескольких часов, а разработка схемы вручную может потребовать недели и месяцы;
- **разнообразие:** синтез дает множество решений, из которых разработчик по технико-экономическим соображениям выбирает оптимальное;
- **исследование разных вариантов:** доступно больше вариантов решений на первой итерации изготовления СВЧ ИС;
- **производительность труда:** используя синтез, можно разрабатывать большее число схем без увеличения команды разработчиков;
- **учет технологии в синтезе:** характеристики элементов считываются из PDK и загружаются в программы синтеза.

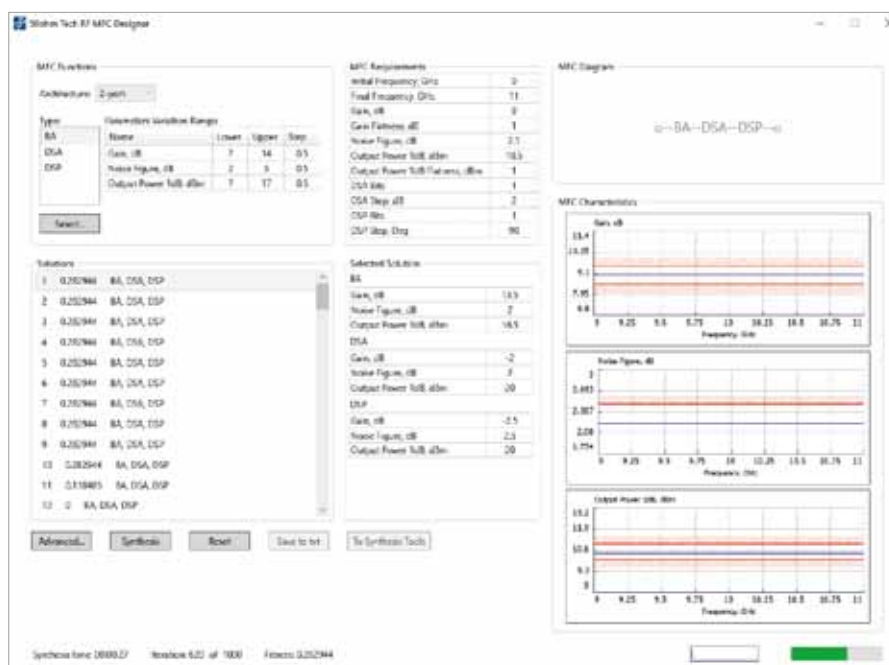


Рис. 1. Графический интерфейс модуля синтеза архитектуры СВЧ МФИС

МОДУЛИ САПР «СМЕКАЛЕЦ» Модуль синтеза архитектуры радиосистемы

СВЧ МФИС содержит набор отдельных функциональных блоков, основными из которых являются усилительные каскады, ступенчатые аттенюаторы, ступенчатые фазовращатели [2, 3]. При проектировании архитектуры радиосистемы по комплексу требований МФИС необходимо определить количество и порядок следования отдельных функциональных блоков, а также требования к их электрическим характеристикам. Эти требования затем передаются в другие модули синтеза, рассмотренные ниже. Модуль синтеза архитектуры радиосистемы представлен на рис. 1.

Модуль синтеза усилителя с распределенным усилением

Усилители с распределенным усилением (УРУ), также называемые усилителями бегущей волны, среди усилителей всех классов выделяются наибольшей шириной полосы. Интегральные СВЧ УРУ используются как предварительные и оконечные усилительные каскады, отдельные усилители, а также в составе комбинированных усилителей или МФИС [4]. Основной сложностью при разработке интегрального СВЧ УРУ является определение оптимального количества секций и суммарной ширины затворов активных элементов. Упрощенные методики проектирования не гарантируют оптимальный результат. Использование синтеза при проектировании интегрального СВЧ УРУ

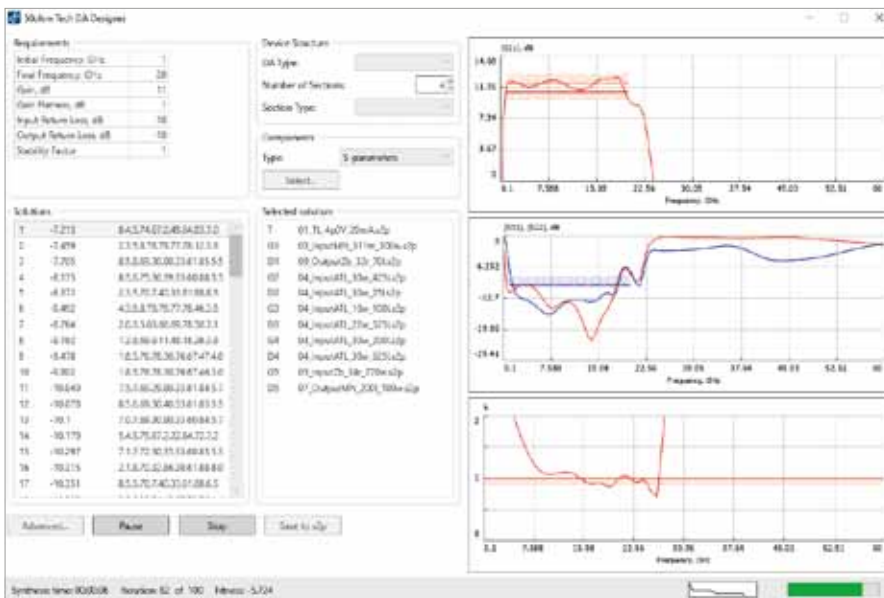


Рис. 2. Графический интерфейс модуля синтеза СВЧ УРУ

позволяет получить для выбранной интегральной технологии качественное начальное приближение, удовлетворяющее требованиям к комплексу линейных характеристик. Модуль синтеза УРУ представлен на рис. 2.

Модуль синтеза секций ступенчатого аттенюатора

Ступенчатые аттенюаторы ослабляют радиосигнал на величину, заданную сигналом управления. Отдельные сигналы для каждой секции аттенюатора определяют, вносит она ослабление или нет. Модуль синтеза позволяет получить схемное решение секции, соответствующее заданным требованиям к значению вносимого ослабления, потерям в опорном состоянии и другим условиям. В составе секции могут быть резисторы, транзисторы в ключевом режиме, а также реактивные элементы для фазовой коррекции.

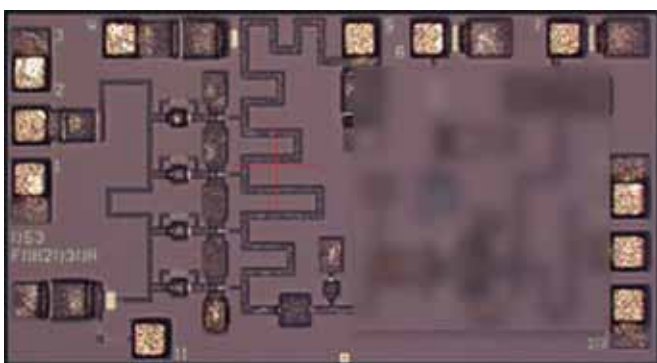


Рис. 3. Микрофотография УРУ диапазона 20–30 ГГц

Модуль синтеза секций ступенчатого фазовращателя

Ступенчатые фазовращатели управляют фазой радиосигнала и сходны по принципу работы со ступенчатыми аттенюаторами. С помощью модуля синтеза находится схемное решение секции ступенчатого фазовращателя по заданным требованиям к вносимому фазовому сдвигу, уровню ошибок по модулю и фазе и т. д.

Модуль синтеза цифровых драйверов управления

Амплитуда и фаза радиосигнала в МФИС изменяются кодовым словом. Последовательно-параллельные цифровые драйверы управления преобразуют напряжение управляющего сигнала из TTL-логики в GaAs-логику, конвертируют последовательный код в параллельный и формируют управляющие сигналы для секций аттенюаторов, фазовращателей или коммутаторов [5, 6]. Модуль дает возможность синтезировать схемное решение интегрированного драйвера с применением нормально открытых GaAs pHEMT-транзисторов, оптимальных по потребляемой мощности, занимаемой площади и быстродействию.

Драйвер произвольной разрядности собирается из синтезированных блоков – входного и выходного преобразователей напряжения и регистров сдвига и хранения на основе динамических D-триггеров.

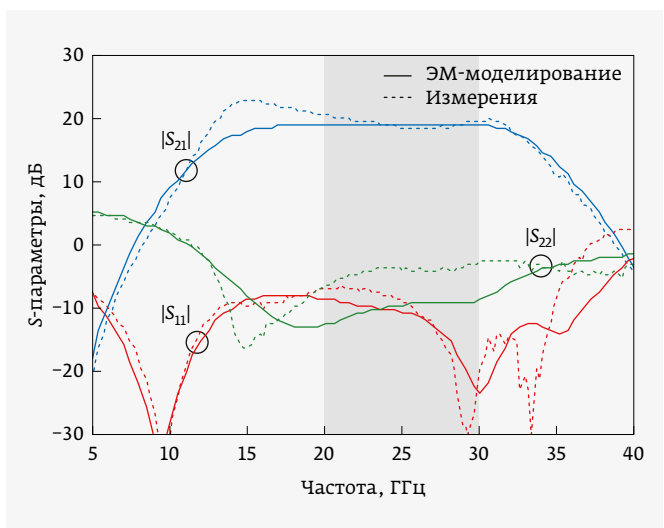


Рис. 4. Характеристики УРУ диапазона 20–30 ГГц

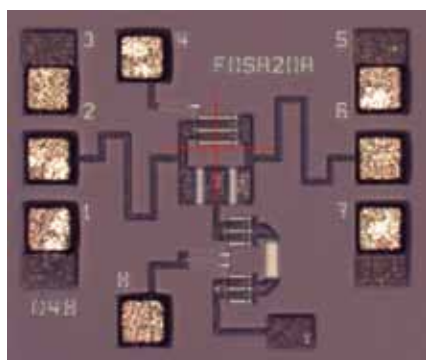


Рис. 5. Микрофотография 2-дБ-секции аттенюатора

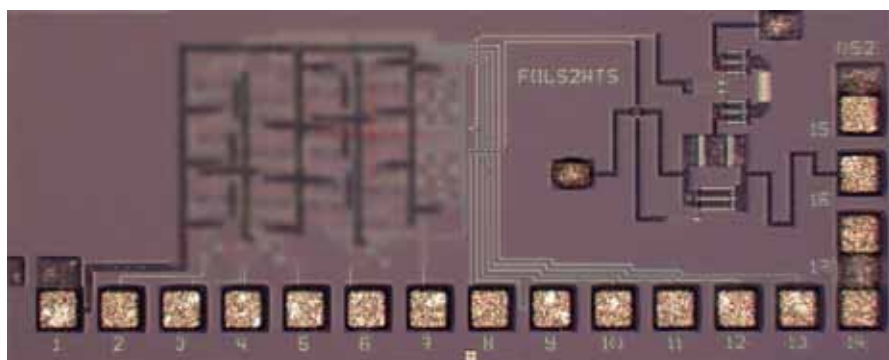


Рис. 7. Микрофотография однобитного цифрового драйвера управления

Примеры синтезированных схем

В данном разделе приведены примеры нескольких устройств. Все схемные решения были синтезированы описанными выше модулями и изготовлены по 0,25 мкм GaAs pHEMT-технологии в ОАО «Светлана-Рост».

Был разработан буферный усилитель диапазона 20–30 ГГц с выходной мощностью при компрессии коэффициента усиления на 1 дБ не менее 20 дБм и коэффициентом усиления не менее 12 дБ. Чтобы обеспечить широкополосное согласование усилителя, входной каскад выполнен по схеме УРУ, синтезированного с помощью САПР «Смекалец». Фотография разработанного буферного усилителя представлена на рис. 3, а его характеристики – на рис. 4. Время синтеза не более получаса.

На рис. 5 представлена синтезированная секция аттенюатора с ослаблением 2 дБ, а на рис. 6 – результаты измерения ее параметров. Время синтеза

секции – несколько минут. При более сложных требованиях время синтеза может увеличиваться до десятков минут.

На рис. 7 приведена тестовая структура однобитного последовательно-параллельно цифрового драйвера управления. Используется схемотехника исключительно на нормально открытых GaAs pHEMT-транзисторах. На рис. 8а показаны результаты моделирования и измерения параметров драйвера (в моделирование добавлены измерительные кабели). Также был изготовлен и измерен 4-битный регистр сдвига. Результаты измерений представлены на рис. 8б. Время синтеза – несколько часов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модули САПР «Смекалец» позволяют проектировать некоторые классы СВЧ-устройств, а также синтезировать архитектуру МФИС. Синтез значительно ускоряет разработку микросистемных СВЧ-устройств. Чтобы

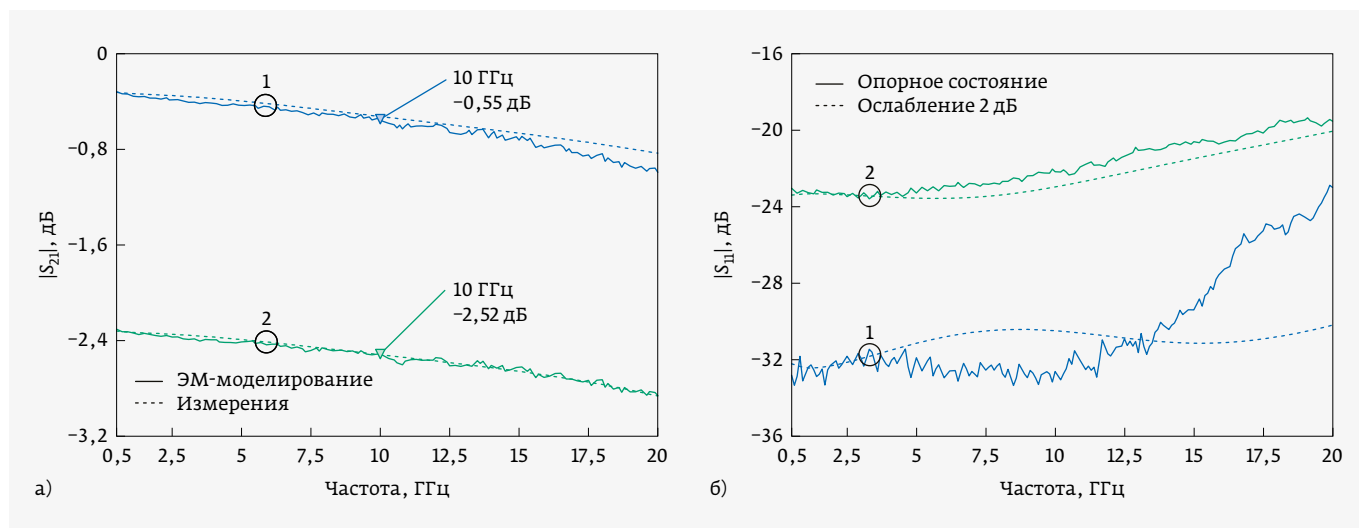


Рис. 6. Характеристики 2-дБ-секции аттенюатора

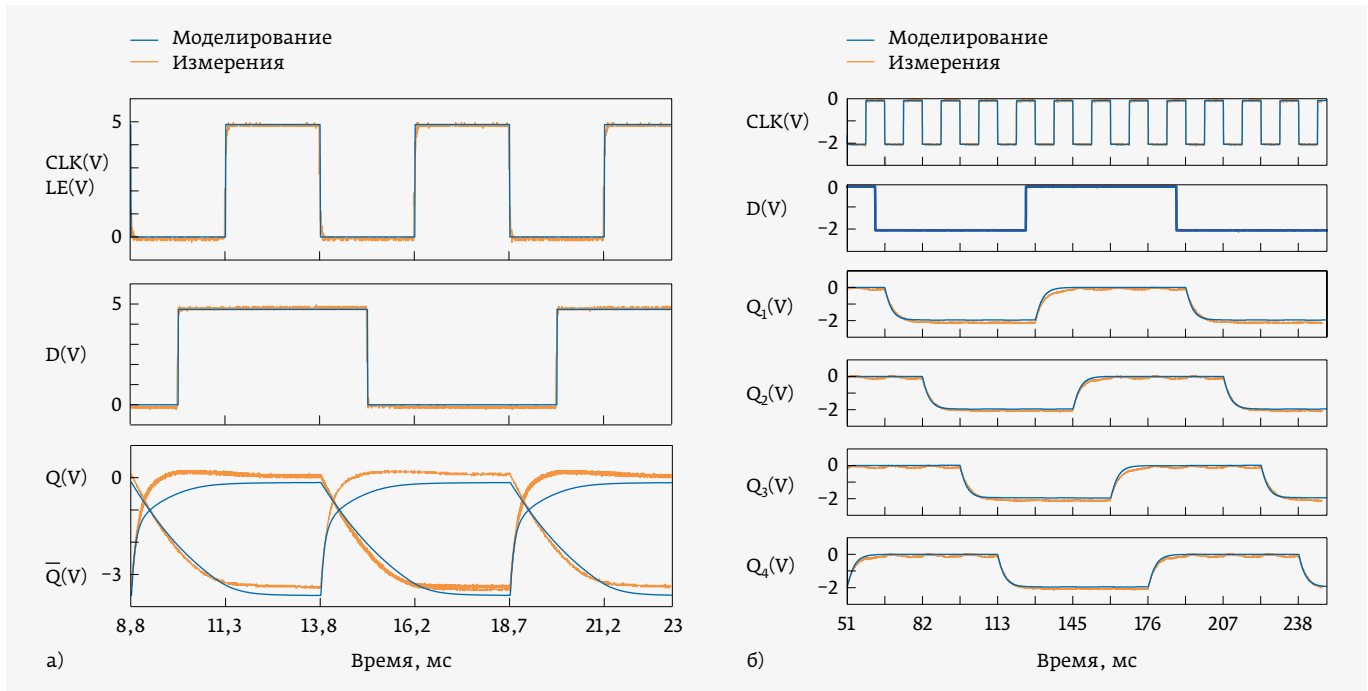


Рис. 8. Характеристики однобитного цифрового драйвера управления (а) и регистра сдвига (б)

разработчик мог синтезировать схемы для определенного технологического процесса, предприятию – изготовителю СВЧ МИС необходимо предоставить библиотеку стандартных элементов (PDK). В данной работе показан синтез схем для технологического процесса 0,25 мкм GaAs pHEMT, используемого в ОАО «Светлана-Рост» (Санкт-Петербург). В табл. 1 представлена степень разработки и готовности к использованию отдельных модулей.

Таблица 1. Степень готовности модулей САПР «Смекалец»

Модули САПР «Смекалец»	Готовность, %
Синтез архитектуры МФИС	30
Синтез малошумящих и буферных усилителей	60
Синтез аттенюаторов	45
Синтез фазовращателей	45
Синтез усилителей мощности	10
Синтез переключателей	5
Синтез цифровых драйверов управления	55
Использование библиотек стандартных элементов	60
Синтез топологии блоков	0

Предприятиям радиоэлектронной промышленности предоставляется возможность пройти тест-драйв опытных образцов модулей САПР «Смекалец». Пишите нам на электронную почту info@50ohm.tech.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Dobush I. M. et al.** Development of a 0.15 μm GaAs pHEMT Process Design Kit for Low-Noise Applications // Electronics. 2021. 10. 2775.
2. **Кондратенко А. В. и др.** Функциональные узлы радиотракта ППМ АФАР X-диапазона в монолитном интегральном исполнении // VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем». 2020. С. 100–109.
3. **Щербаков Ф. Е. и др.** Многофункциональная МИС с малым энергопотреблением на основе 2-уровневых pHEMT для перспективных модулей АФАР // Сборник трудов конференции «Микроэлектроника СВЧ». СПб, 2012. С. 4–7.
4. **Campbell C. F.** Evolution of the Nonuniform Distributed Power Amplifier: A Distinguished Microwave Lecture // IEEE Microwave Magazine. 2019. V. 20. No 1. PP. 18–27.
5. **Билевич Д. В.** Обзор цифровых драйверов управления СВЧ многофункциональных интегральных схем на основе GaAs-технологии // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. 2021. № 3. С. 26–41.
6. **Ramella C., Estebarsari M., Nasri A., Pirola M.** GaAs-Based Serial-Input-Parallel-Output Interfaces for Microwave Core-Chips // Electronics. 2021. V. 10. No 23. P. 3029.



ГРУППА КОМПАНИЙ

ЭЛЕКТРОННОЕ СПЕЦИАЛЬНОЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

АО НПП ЭСТО (Группа компаний ЭСТО) - объединение ведущих российских предприятий, специализирующихся на разработках, производстве, модернизации, продаже и сервисном обслуживании специального технологического оборудования.

Направления деятельности группы «ЭСТО»

Разработка и производство технологического оборудования (лазерное, вакуумное, сборочное, нестандартное) и внедрение технологий

Организация поставок как отдельных единиц зарубежного технологического оборудования, так и комплексных законченных технологий «под ключ»

Комплексная и частичная модернизация российского и зарубежного технологического оборудования любой сложности

Сервисное обслуживание российского и зарубежного технологического оборудования

Проектирование и строительство производств микроэлектроники

Обучение специалистов заказчика

Технологический аудит производства

Акционерное общество
«Научно-производственное
предприятие «Электронное
специальное технологическое
оборудование»

124460, Москва, Зеленоград,
просп. Георгиевский, д. 5, стр. 1
тел.: (499) 729-77-51,
(499) 479-12-39
info@nppesto.ru
www.nppesto.ru



Приглашаем Вас посетить наш стенд №А1045 на выставке технологий, оборудования и материалов для производства изделий электронной и электротехнической промышленности **ЭлектронТехЭкспо 2022** 12-14 апреля 2022 г, МВЦ «Крокус Экспо», Павильон №3, Зал №1