

РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**RUSSIAN
TECHNOLOGICAL
JOURNAL**



Информационные системы

Информатика

Проблемы информационной безопасности

Роботизированные комплексы и системы

Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

Микро- и наноэлектроника

Физика конденсированного состояния

Аналитическое приборостроение и технологии

*Экономика наукоемких и высокотехнологичных
предприятий и производств*

Мировоззренческие основы технологии и общества



СОДЕРЖАНИЕ

МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Лавров С.Д.** Экспериментальное исследование и расчет эффективности генерации второй оптической гармоники в доменных структурах ниобата лития 3

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ИНФОРМАТИКА. ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

- Трубиенко О.В., Журавлев С.И., Сороковиков В.И., Набатов Д.В., Худяков А.А., Крылов А.В.** Основные принципы оценки безопасности программного обеспечения и перспективы их развития 13

СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Битюков В.К., Жуков А.Н., Симачков Д.С.** Метод бесконтактного определения температуры поверхности объектов радиоэлектроники 21
- Гончаренко В.М., Чемесов К.С., Третьяков Е.Б., Марьин С.В.** Антенна бегущей волны с уменьшенным уровнем боковых лепестков за счет переменной фазовой скорости 33
- Кранухин Д.В., Мальцев П.П.** Монолитная интегральная схема маломощного усилителя на нитриде галлия для диапазона 57–64 ГГц 42

ЭКОНОМИКА НАУКОЕМКИХ И ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ПРОИЗВОДСТВ

- Куликова Н.Н.** Анализ коллаборативности как инструмент управления межорганизационными взаимоотношениями предприятий электронной промышленности 54

МИРОВОЗЗРЕНЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ И ОБЩЕСТВА

- Бодрова Е.В., Пирумов А.Р.** Подготовка высококвалифицированных специалистов в области техники и технологии как фактор успешной модернизации России 62
- Сухорукова С.М., Погорелый А.М., Самороков А.В.** Влияние международного технологического разделения труда на экологическую и промышленную безопасность 71

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Сигов А.С. Главный редактор журнала, Президент Московского технологического университета, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, e-mail: sigov@mirea.ru

Кудж С.А. Ректор Московского технологического университета, д.т.н., профессор, e-mail: rector@mirea.ru

Большаков А.К. Директор Института инновационных технологий и государственного управления Московского технологического университета, к.э.н., доцент, e-mail: bolshakov@mirea.ru

Буслаева Т.М. Профессор, д.х.н., Московский технологический университет (МИТХТ), e-mail: buslaeva@mirea.ru

Герасин А.Н. Директор Института управления и стратегического развития организаций Московского технологического университета (МГУПИ), д.э.н., профессор, e-mail: gerasin_an@mgupi.ru

Есипова О.В. Ответственный секретарь, к.х.н., доцент, Московский технологический университет (МИТХТ), e-mail: esipova@mirea.ru

Жуков Д.О. Заведующий кафедрой интеллектуальных технологий и систем Московского технологического университета (МИРЭА), д.т.н., профессор, e-mail: zhukov_do@mirea.ru

Карнаков В.В. Директор Института комплексной безопасности и специального приборостроения Московского технологического университета (МГУПИ), к.т.н., e-mail: karnakov_vv@mgupi.ru

Кимель А.В. К.ф.-м.н., Университет г. Наймеген (Нидерланды), e-mail: a.kimel@science.ru.nl

Кондратенко В.С. Директор Физико-технологического института Московского технологического университета (МГУПИ), д.т.н., профессор, e-mail: kondratenko_vs@mgupi.ru

Кузнецов В.В. Советник ректората Московского технологического университета, к.т.н., доцент, e-mail: kuznetsov@mirea.ru

Куликов Г.В. Директор Института радиотехнических и телекоммуникационных систем Московского технологического университета (МИРЭА), д.т.н., профессор, e-mail: kulikov@mirea.ru

Перно Филипп. Проректор по научной работе Высшей инженерной школы, профессор, г. Лилль, Франция

Романов М.П. Директор Института кибернетики Московского технологического университета (МИРЭА), д.т.н., профессор, e-mail: m_romanov@mirea.ru

Савиных В.П. Президент МИИГАиК, член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор, e-mail: president@miigaik.ru

Скотт Джеймс. Профессор, член Лондонского Королевского общества, Университет г. Кембридж, Великобритания, e-mail: jamescott@acm.org

Цветков В.Я. Советник ректората Московского технологического университета, д.т.н., профессор, e-mail: cvj2@mail.ru

РЕДАКЦИЯ

Сигов А.С. Главный редактор журнала, д.ф.-м.н., профессор, e-mail: sigov@mirea.ru

Буслаева Т.М. Профессор, д.х.н., e-mail: buslaeva@mirea.ru

Есипова О.В. Ответственный секретарь, к.х.н., доцент, e-mail: esipova@mirea.ru

Семерня Л.Г. Технический редактор, e-mail: semernya@mirea.ru

Середина Г.Д. Зав. редакцией, к.т.н., e-mail: seredina@mirea.ru

Цветков В.Я. Профессор, д.т.н., e-mail: cvj2@mail.ru

Адрес редакции:

Россия, 119571, Москва, пр. Вернадского, д. 86, оф. Л-119
Тел.: +7 (495) 246-05-55 (#2-88); e-mail: seredina@mirea.ru

УДК 535.135

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ В ДОМЕННЫХ СТРУКТУРАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

С.Д. Лавров, аспирант

Московский технологический университет, Москва, 107076 Россия

@Автор для переписки, e-mail: sdlavrov@mail.ru

В работе представлены экспериментальные и теоретические результаты исследования нелинейно-оптических свойств доменных структур ниобата лития, созданных с помощью сфокусированного электронного пучка. Экспериментальные результаты получены с помощью методики сканирующей конфокальной микроскопии, позволяющей проводить неdestructивный анализ геометрических объемных параметров доменных структур, благодаря высокой чувствительности второй оптической гармоники к сегнето-электрической поляризации исследуемого материала. Показано наличие периодического сигнала мощности второй оптической гармоники в местах расположения доменных структур. На основе модели Бойда произведено численное моделирование мощности второй оптической гармоники в объеме кристалла с учетом фокусировки оптического излучения в его объеме. Показано согласование полученных теоретических и экспериментальных результатов. Продемонстрирована возможность определения объемных параметров доменных структур с помощью конфокальной нелинейно-оптической микроскопии.

Ключевые слова: доменные структуры, нелинейно-оптическая микроскопия, моделирование второй оптической гармоники.

CALCULATION OF THE OPTICAL SECOND HARMONIC GENERATION EFFICIENCY IN THE LITHIUM NIOBATE DOMAIN STRUCTURES

S.D. Lavrov

Moscow Technological University, Moscow, 107076 Russia

@Corresponding author, e-mail: sdlavrov@mail.ru

The paper presents the experimental and theoretical study results of nonlinear optical properties of lithium niobate domain structures created by a focused electron beam. The presence of a second optical harmonic periodic signal in the locations of the domain structures is shown. The numerical simulation of the second harmonic optical power was done based on the model of Boyd. The possibility of determining the volumetric parameters of domain structures using nonlinear confocal optical microscopy is shown.

Keywords: domain structure, nonlinear optical microscopy, optical second harmonic simulation.

Упорядоченные сегнетоэлектрические доменные структуры в настоящее время представляют большой интерес для приборов оптоэлектроники. Одним из самых распространенных материалов, используемых в доменной инженерии, является ниобат лития (LiNbO_3). На его основе создаются такие оптические приборы как преобразователи оптических частот [1], высокоскоростные оптические модуляторы для телекоммуникационных систем [2, 3] и целый ряд других устройств.

Целью настоящей работы является выявление особенностей формирования микронных по толщине доменных структур в волноводном слое монокристаллического образца LiNbO_3 и моделирование оптических свойств полученных структур.

Экспериментальная часть

Исследуемый образец представлял собой объемный монокристалл ниобата лития (LiNbO_3) Y-среза толщиной 2 мм. С помощью метода ионной имплантации в приповерхностном слое кристалла был создан оптический волновод, ограничивающий область пространства, в котором происходит распространение оптического излучения [4]. Кроме того, волноводный слой является препятствием для роста доменных структур, что связано с наличием дефектов на его границе.

С помощью сфокусированного электронного луча осуществлено локальное облучение поверхности кристалла. Такое локальное облучение приводит к сегнетоэлектрическому переключению поляризации в структуре – росту доменов вдоль полярной оси Z.

В исследуемой структуре глубина «прорастания» доменов ограничена волноводным слоем и поэтому не превышала 4 мкм. При этом максимальная толщина доменов в объеме LiNbO_3 достигалась только в местах экспонирования сфокусированным электронным лучом.

В качестве источника оптического излучения использовали титан-сапфировый фемтосекундный лазер TiF-100 производства «Авеста-Проект» с длиной волны накачки 800 нм, длительностью импульсов 80 фс и частотой следования импульсов 80 МГц. Лазерное излучение направляли в сканирующий конфокальный оптический микроскоп alpha300s+ производства «WITec» и фокусировали на исследуемом образце с помощью ахроматического объектива с числовой апертурой, равной 0.75. Направление поляризации лазерного излучения выбирали перпендикулярным доменным структурам. Исследуемый образец фиксировали на сканирующем пьезостолике микроскопа, который можно перемещать в пространстве.

Лазерное излучение, отраженное от образца, и излучение второй гармоники (ВГ), сформированное образцом, собирали объективом в обратном направлении, после чего оно проходило через набор notch-фильтров. Эти фильтры позволяют выделить из оптического спектра только излучение ВГ. Далее излучение ВГ через многомодовое оптическое волокно, выполняющее роль диафрагмы, направляли во встроенный в микроскоп фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Таким образом, при последовательном перемещении столика и детектировании сигнала с помощью ФЭУ возможно получение распределения мощности ВГ как по поверхности, так и в объеме исследуемого образца.

Результаты и их обсуждение

При варьировании положения точек облучения на поверхности образца и изменении параметров электронного пучка возможно создание целого набора различных структур

– например, периодических решеток. Таким образом, можно точно задавать такие параметры доменов, как глубина, ширина, длина, положение в пространстве и т. д.

Рост доменов вдоль полярной оси Z сопровождается равномерным уменьшением толщины домена [5]. Принципиальная схема роста доменов приведена на рис. 1.

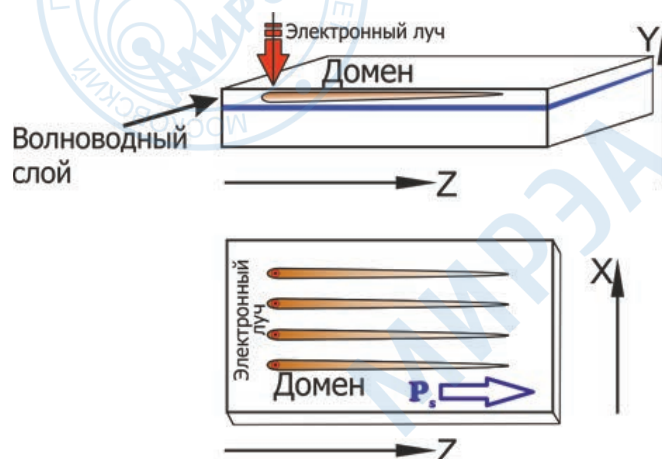


Рис. 1. Схема упорядоченных доменных структур, полученных при помощи облучения поверхности Y-среза монокристалла электронным пучком.

Для исследования доменных структур используется большое количество методов и методик. Самыми распространенными являются методы селективного химического травления, пироэлектрического зонда, сканирующей электронной микроскопии, нематических жидких кристаллов и сканирующей зондовой микроскопии. Однако не все из них применимы для неdestructивного исследования объемных свойств доменных структур.

В данной работе для исследования параметров доменных структур использована методика нелинейно-оптической конфокальной микроскопии. Обладая высоким пространственным разрешением и не являясь деструктивной, нелинейно-оптическая микроскопия позволяет получать информацию об объемных свойствах исследуемых доменных структур на основе LiNbO_3 , благодаря их высокой оптической прозрачности. Основные принципы экспериментальной методики, использованной в данной работе, основаны на классическом подходе, разработанном Уэсу [6, 7].

Экспериментальные результаты по картированию ВГ представлены на рис. 2. На изображении отчетливо видны протяженные темно-светлые полосы, отвечающие положению доменных решеток. Зеленым прямоугольником отмечено место локального облучения структуры электронным пучком. Рост доменов происходил направо от места облучения вдоль полярной оси Z . Очевидно (рис. 2), что при одинаковых условиях экспонирования длина доменов различна, вероятно, вследствие структурной неоднородности кристалла. Также очевидна периодичность сигнала ВГ вдоль каждого из доменов. Наблюдаемый эффект обусловлен уменьшением толщины домена вдоль полярной оси Z .

Сечения вдоль нескольких доменов (отмечены цифрами 1–3) представлены на рис. 3. Период интенсивности ВГ вдоль доменов в исследованном образце мог варьироваться от 4 до 15 мкм.

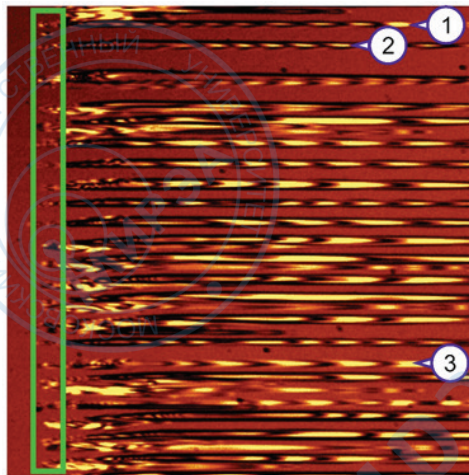


Рис. 2. Распределение сигнала ВГ на поверхности доменных структур LiNbO_3 , полученное методом нелинейно-оптической конфокальной микроскопии; зеленым прямоугольником отмечены места локального облучения структуры электронным пучком; цифрами указаны исследуемые домены.

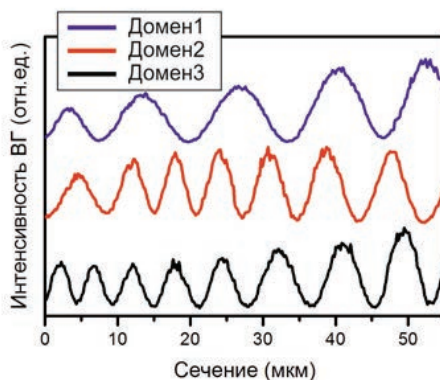


Рис. 3. Сечение доменных структур, приведенных на рис. 2.

Теоретическое моделирование нелинейно-оптических процессов, происходящих в объеме нелинейно-оптических материалов, и их сравнение с экспериментальными результатами выполняли и ранее [8, 9]. Однако в указанных работах не учитывали наличие периодической доменной структуры с переменной толщиной доменов.

В основе теоретической оценки интенсивности генерации второй оптической гармоники в объеме доменных структур использовали модель Бойда [10]. Согласно этой модели, генерация ВГ будет происходить только на границах нелинейно-оптического материала, а в объеме – отсутствовать. Этот эффект вызван скачком фазы излучения накачки при прохождении через точку фокуса (сдвиг фазы Гойи) [11].

На интенсивность распределения сигнала ВГ оказывают влияние интерференционные эффекты. Однако в данном случае из-за жесткой фокусировки лазерного излучения и достаточно толстого волноводного слоя интерференционный вклад незначителен.

Вывод основных выражений для численного описания мощности генерации ВГ, приведенных в настоящей работе и полученных с использованием вышеуказанной модели, приведен ниже.

Запишем стандартное волновое уравнение, вытекающее из уравнений Максвелла, действительное для различных частотных компонент поля:

$$\nabla^2 \tilde{E}_n - \frac{1}{(c/n)^2} \frac{\partial^2 \tilde{E}_n}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon_0 c^2} \frac{\partial^2 \tilde{P}_n}{\partial t^2} \quad (1)$$

где $\tilde{E}_n$ – напряженность электрического поля (индекс n отвечает за частотные компоненты);

$\tilde{P}_n$ – вектор поляризации вещества;

c – скорость света в вакууме;

n – показатель преломления вещества;

ε_0 – диэлектрическая постоянная.

Напряженность электрического поля и вектор поляризации можно представить здесь в следующем виде [12]:

$$\begin{aligned} \tilde{E}_n(r, t) &= A_n(r) e^{i(k_n z - \omega_n t)} + C \\ \tilde{P}_n(r, t) &= p_n(r) e^{i(k_n' z - \omega_n t)} + C \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь комплексные амплитуды A_n и p_n являются пространственно-зависимыми, что позволяет учитывать волны сложной формы. Учитывается также возможность различия волновых векторов k_n и k_n' , что позволяет описать волновое рассогласование.

Подставив выражения (2) в выражение (1), осуществив переход к цилиндрической системе координат и используя приближение медленно меняющихся амплитуд, получим:

$$2ik_n \frac{\partial A_n}{\partial z} + \nabla_T^2 A_n = -\frac{\omega_n^2}{\varepsilon_0 c^2} p_n e^{i\Delta k z} \quad (3)$$

где $\Delta k = k_n' - k_n$.

Данное выражение принято называть параксиальным волновым выражением.

Для описания распределения интенсивности полей в пространстве необходимо ввести Гауссову функцию [13]. В краткой форме ее удобно записать так:

$$A(r, z) = \frac{\mathcal{A}}{1 + iz/z_R} e^{-r^2/w_0^2(1 + iz/z_R)} \quad (4)$$

где w_0 – радиус перетяжки лазерного излучения;

Z_R – длина Рэлея.

Радиус перетяжки лазерного излучения для высокоапертурных иммерсионных объективов оценивается по следующей формуле:

$$w_0 = \frac{1.22\lambda}{4n_0} \sqrt{(n_0 / NA)^2 - 1} \quad (5)$$

где λ – длина волны;

n_0 – показатель преломления иммерсионного масла;

NA – числовая апертура объектива.

Чтобы рассчитать полную мощность гауссова пучка, необходимо вычислить интеграл поперечного распределения интенсивности $P = \int I 2\pi r dr$. Учитывая, что интенсивность определяется выражением $I = 2n\epsilon_0 c |A|^2$, можно записать общую мощность гауссова пучка P как [14]:

$$P = n\epsilon_0 c \pi w_0^2 |A|^2 \quad (6)$$

Далее необходимо рассмотреть генерацию ВГ под действием гауссова пучка накачки. Для этого вводим коэффициент нелинейной восприимчивости χ . Преобразуем выражение (3), представив комплексную амплитуду поляризации в виде:

$$p_2 = \epsilon_0 \chi A_1^2 \quad (7)$$

где χ – нелинейная восприимчивость среды;

A_1 – комплексная амплитуда излучения накачки.

В итоге выражение (3) примет следующую форму:

$$2ik_2 \frac{\partial A_2}{\partial z} + \nabla_r^2 A_2 = -\frac{\omega_2^2}{c^2} \chi A_1^2 e^{i\Delta k z} \quad (8)$$

При этом волновое рассогласование будет определяться следующим образом:

$$\Delta k = 2k_1 - k_2 \quad (9)$$

Подставив в выражение (8) амплитуды гауссовых пучков накачки и ВГ из выражения (4), получим следующую функцию:

$$\frac{dA_2}{dz} = \frac{i\omega}{n_2 c} \chi A_1^2 \frac{e^{i\Delta k z}}{1 + iz / z_R} \quad (10)$$

После интегрирования данного выражения, амплитуда интенсивности ВГ принимает вид:

$$A_2(z) = \frac{i\omega}{n_2 c} \chi A_1^2 J(zf, d, \Delta k, z_R) \quad (11)$$

где функция $J(z_f, d, \Delta k, z_R)$ представлена в виде [15,16]:

$$J(z_f, d, \Delta k, z_R) = \int_{-z_f}^{-z_f+d} \frac{e^{i\Delta k z} dz}{1 + iz / z_R} \quad (12)$$

В данном выражении пределы интегрирования выбраны, исходя из координаты положения точки фокуса объектива z_f и толщины доменной структуры d . При этом считается, что образец полубесконечный. Схема фокусировки оптического излучения представлена на рис. 4.

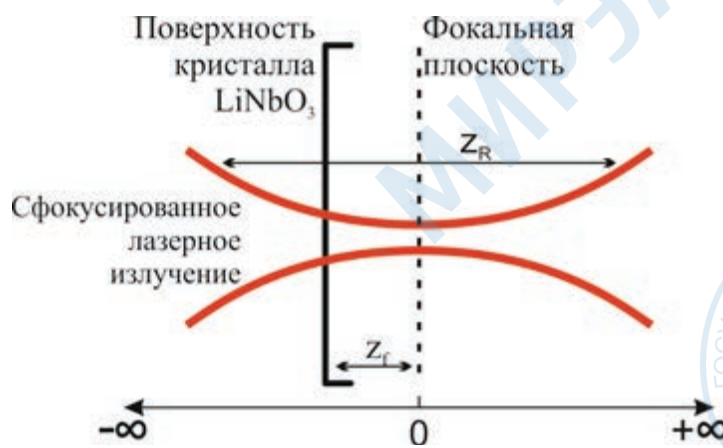


Рис. 4. Схема фокусировки оптического излучения.

Для перевода интенсивности ВГ (11) в мощность необходимо использовать выражение (6). Следует учитывать, что генерация ВГ происходит во всей области перетяжки w_0 для излучения накачки, поэтому разница в значениях радиусов перетяжки для разных длин волн не дает никакого вклада. Итоговая формула имеет вид:

$$P_2 = \frac{|\chi|^2}{\pi w_0^2} \frac{\omega^2}{n_1^2 n_2^3 \epsilon_0} P_1^2 |J(\Delta k, z_0, z)|^2 \quad (13)$$

Приведенное выражение позволяет количественно оценить мощность генерации ВГ в рассматриваемых структурах LiNbO_3 . Однако данная модель не учитывает все особенности экспериментальной установки, такие как диаметр конфокальной апертуры, спектральная чувствительность фотоэлектронного умножителя, режимы работы синхронного детектора, световые aberrации и эффективность распространения оптического излучения в системе. Для более аккуратной оценки необходимо проводить сравнение с нормировочным образцом, параметры генерации ВГ в котором известны (например, кварц). В то же время особенности исследуемого образца (наличие волноводного слоя, периодических доменов и т.д.) не позволяют осуществить это в полной мере, и в приведенных теоретических результатах значение мощности ВГ дано в относительных единицах.

В выполненных нами расчетах значения коэффициентов преломления выбраны $n_1 = 2,176$; $n_2 = 2,331$, согласно работе [17]. Варьируемыми параметрами, влияющими на

мощность ВГ в данном случае, являются числовая апертура объектива, толщина домена и положение фокальной плоскости. Числовая апертура объектива является фиксированной величиной и определяется выбором фокусирующей системы в ходе эксперимента. Как показано в экспериментальной части работы, мы использовали объектив с NA , равной 0.75.

Используя формулу (13) для доменных структур LiNbO_3 , можно получить набор зависимостей для оценки мощности ВГ, принимая положение фокуса объектива z_f и толщину доменной структуры d в качестве переменных. На ее основе построена зависимость мощности ВГ от толщины отдельного домена (рис. 5).

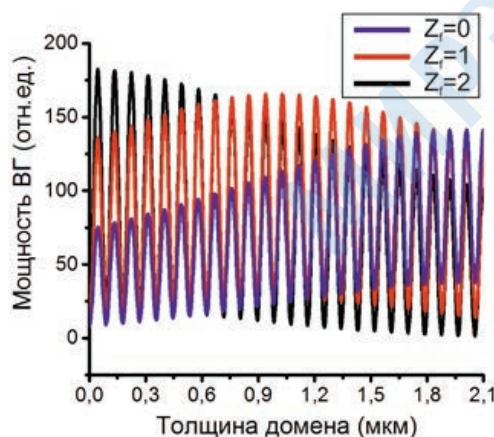


Рис. 5. Зависимость мощности ВГ от толщины отдельного домена.

Полученная функция является периодической с фиксированным периодом, равным 90 нм. При этом изменение положения фокальной плоскости не влияет на период и отвечает только за положение максимума огибающей данной функции.

Для определения влияния глубины фокуса на мощность ВГ построена также зависимость, представленная на рис. 6. Количественные значения толщин доменов выбраны согласно рис. 5 – использовались максимумы периодической функции. Отрицательная область на графике соответствует фокусировке перед образцом, положительная – в объеме образца (см. рис. 4).

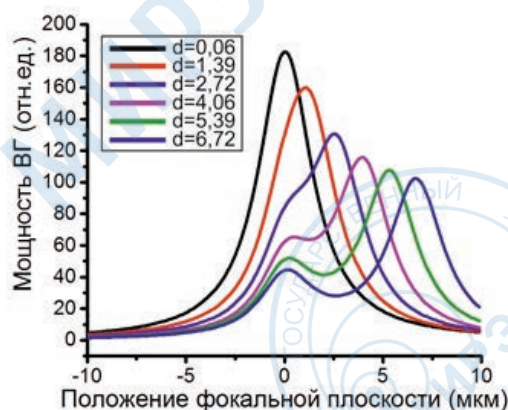


Рис. 6. Моделирование мощности ВГ при варьировании значений толщины домена и положения фокальной плоскости.

Согласно зависимостям на рис. 6, при увеличении толщины домена происходит сдвиг максимума мощности ВГ в фокальной плоскости. Достижение определенной толщины доменной структуры (4 мкм) сопровождается появлением дополнительного максимума ВГ, что связано с эффективной генерацией ВГ на обратной границе доменной структуры. В случае больших значений толщины домена происходит разделение пиков, причем мощность ВГ второго пика больше. Данный эффект связан с увеличенной плотностью мощности в объеме кристалла, что вызвано меньшим диаметром пучка излучения в объеме кристалла.

Для наглядной визуализации зависимости мощности ВГ построена двумерная зависимость от глубины фокуса z_f и толщины домена d (рис. 7). Характер построенных теоретических зависимостей качественно совпадает с экспериментальными результатами, что подтверждает работоспособность представленной модели.

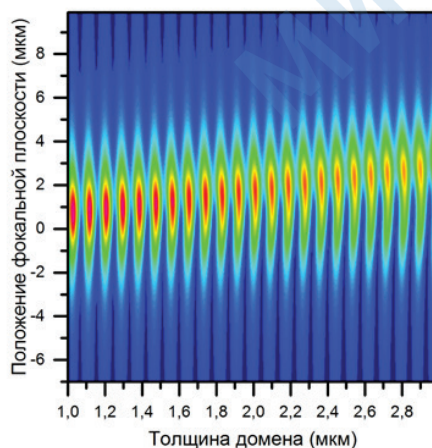


Рис. 7. Моделирование мощности ВГ при варьировании значений толщины домена и положения фокальной плоскости.

Заключение

Полученная нами модель позволяет описать периодические изменения мощности второй оптической гармоники в объемных доменных структурах LiNbO_3 . На основе полученных результатов возможно определить оптимальные геометрические параметры фокусирующей системы и доменных структур для максимальной эффективности генерации второй гармоники.

Литература:

1. Myers L.E. [et al.] Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO_3 // J. Opt. Soc. Am. B. 1995. V. 12, № 11. P. 2102–2116.
2. Wooten E.L. [et al.] A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2000. V. 6, № 1. P. 69–82.
3. Lucchi F. [et al.] Very low voltage single drive domain inverted LiNbO_3 integrated electro-optic modulator // Opt. Express. 2007. V. 15, № 17. P. 10739–10743.
4. Chen F. Micro- and submicrometric waveguiding structures in optical crystals produced by ion beams for photonic applications // Laser Photon. Rev. 2012. V. 6, № 5. P. 622–640.

5. Volk T.R. [et al.] Microdomain patterns recorded by an electron beam in he-implanted optical waveguides on X-Cut LiNbO₃ crystals // J. Light. Technol. 2015. V. 33, № 23. P. 4761–4766.
6. Uesu Y. [et al.] 3D images of inverted domain structure in LiNbO₃ using SHG interference microscope // Ferroelectrics. 2004. V. 304, № 1. P. 99–103.
7. Kaneshiro J. [et al.] Three-dimensional observations of polar domain structures using a confocal second-harmonic generation interference microscope // J. Appl. Phys. 2008. V. 104, № 5. P. 1–7.
8. Stoller P. [et al.] Quantitative second-harmonic generation microscopy in collagen // Appl. Opt. 2003. V. 42, № 25. P. 5209–5219.
9. Stoller P. [et al.] Polarization-modulated second harmonic generation in collagen // Biophys. J. 2002. V. 82, № 6. P. 3330–3342.
10. Boyd R.W. Nonlinear Optics. 3rd Edition. Academic Press, 2008. 613 p.
11. Feng S., Winful H.G. Physical origin of the Gouy phase shift. // Opt. Lett. 2001. V. 26, № 8. P. 485–487.
12. Byer R.L. Nonlinear optical phenomena and materials // Annu. Rev. Mater. Sci. 1974. V. 4. P. 147–190.
13. Kleinman D.A., Ashkin A., Boyd G.D. Second-harmonic generation of light by focused laser beams // Phys. Rev. 1966. V. 145, № 1. P. 338–379.
14. Byer R.L., Herbst R.L. Parametric oscillation and mixing // Nonlinear Infrared Gener. 1977. P. 81–137.
15. Kaneshiro J., Uesu Y., Fukui T. Visibility of inverted domain structures using the second harmonic generation microscope: Comparison of interference and non-interference cases // J. Opt. Soc. Am. B. 2010. V. 27, № 5. P. 888.
16. Yokota H., Kaneshiro J., Uesu Y. Optical second harmonic generation microscopy as a tool of material diagnosis // Phys. Res. Int. 2012. V. 2012.
17. Palik E.D. Handbook of Optical Constants of Solids. Academic Press, 1998. 804 p.

УДК 621.382, 26

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ**

О.В. Трубиенко[@], к.т.н., зав. кафедрой

С.И. Журавлев, к.т.н., доцент

В.И. Сороковиков, преподаватель

Д.В. Набатов, аспирант

А.А. Худяков, преподаватель

А.В. Крылов, преподаватель

Московский технологический университет (МИРЭА),

Институт комплексной безопасности и специального приборостроения, Москва, 107996 Россия

Автор для переписки, e-mail: trubienko_ov@mgupr.ru

В статье рассмотрены и проанализированы основные принципы, гарантирующие безопасность программного обеспечения (ПО), используемого при эксплуатации информационных систем. Данные принципы сопоставлены с требованиями Общих критериев для определения того, насколько эти принципы совпадают с современными направлениями в области безопасности информации. Рассмотрены преимущества информационного моделирования с использованием подходов Общих критериев (ОК). Информационное моделирование является удобным и наглядным средством для представления требований ОК. Схемы информационного моделирования в статье показывают движение информации в ИТ и среду безопасности информации (угрозы, политики безопасности информации). Классифицированные, иерархические и взаимоувязанные требования ОК позволяют в полной мере описывать любые документы ОК (профили защиты, задания по безопасности) схемами информационного моделирования.

Ключевые слова: программное обеспечение, принципы обеспечения безопасности, система проверки безопасности ПО, потенциальные скрытые ошибки программного обеспечения, Общие критерии.

**BASIC PRINCIPLES OF ESTIMATION OF SOFTWARE SAFETY
AND PROSPECTS OF THEIR DEVELOPMENT**

O.V. Trubienko,

S.I. Zhuravlev,

V.I. Sorokovikov,

D.V. Nabatov,

**A.A. Khudyako,
A.V. Krylov**

*Moscow Technological University (MIREA),
Moscow, 107996 Russia
Institute of Integrated Security and Special Instrumentation
@Corresponding author e-mail: trubienko_ov@mgupi.ru*

The article describes and analyzes the basic principles of security software used in the operation of information systems. These principles are compared with the requirements of the Common Criteria (CC) for determining whether these principles coincide with the contemporary trends in the field of information security. Benefits of information modeling also considered using the Common Criteria approach. Information Modeling - a convenient and intuitive way for filing requirements CC. Schemes of information modeling in the article show the movement of information in the IT and information security environment (threats, information security policy). Classified, hierarchical and interrelated requirements CC allow you to fully describe any documents CC (protection profiles, security target) schemes of information modeling.

Keywords: principles on security software, security audit system, potentially hidden software errors, Common Criteria.

Введение

В современных условиях трудно переоценить необходимость повышения безопасности программного обеспечения (ПО). В быту мы часто сталкиваемся с устройствами, в которых программное обеспечение работает неустойчиво. Можно привести множество примеров, когда, например, в сотовых телефонах ПО функционирует со сбоями (у одного из авторов на телефоне, созданном компанией NOKIA, постоянно «зависает» операционная система Windows, что приводит к отключению телефона). Это, безусловно, влияет на потребительскую ценность подобных продуктов информационных технологий (ИТ), однако, если ненадежное ПО используется в атомной промышленности, энергетике, в военных отраслях или на иных критически важных объектах, то значимость обеспечения безопасности ПО возрастает [1]. К безопасности информации таких объектов предъявляются особые требования [1], [2].

С целью повышения безопасности информации в статье предлагается использовать моделирование процессов в ИТ для определения «узких мест» в них, а также иных возможных уязвимостей, не прибегая к дорогостоящим натурным испытаниям [2].

Наиболее представительно и показательно такое моделирование в области защиты информации можно продемонстрировать с использованием Общих критериев (между-

^[1]Руководящий документ ФСТЭК России «Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Показатели защищенности от несанкционированного доступа к информации». Утверждено решением председателя Государственной технической комиссии при Президенте Российской Федерации от 30 марта 1992 г.

^[2]Приказ Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК России) от 14 марта 2014 г. № 31 г. Москва «Об утверждении Требований к обеспечению защиты информации в автоматизированных системах управления производственными и технологическими процессами на критически важных объектах, потенциально опасных объектах, а также объектах, представляющих повышенную опасность для жизни и здоровья людей и для окружающей природной среды».

народный стандарт ISO/IEC 15408). Для обоснования выбора Общих критериев (ОК) в качестве основы для информационного моделирования авторы провели сравнительный анализ некоторых современных тенденций (принципов обеспечения безопасности ПО) в области защиты информации и требований ОК. Сравнение проведено с учетом моделей на основе ОК [3], а также некоторых руководящих документов Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК) России, основанных на применении ОК^{[3], [4], [5]}.

Сопоставление принципов безопасности ПО с требованиями современных систем обеспечения безопасности

Для проведения исследования по сопоставлению некоторых современных показателей защищенности ПО с требованиями ОК наиболее представительные подходы обеспечения безопасности ПО выбраны из литературы [4–11]. Данные показатели приведены в таблице в столбце 3 «Современные принципы обеспечения безопасности ПО», а наименования требований ОК – в столбцах 1 и 2.

Анализ данных, представленных в таблице, показывает, что выбранные авторами принципы (третий столбец), с одной стороны, недостаточны в сравнении с ОК, но, с другой стороны, расширяют требования ОК. Однако гибкость принципов ОК состоит в том, что ОК не ограничиваются какими-либо правилами и могут включать любые расширения требований, а в основу ОК положены базовые требования, описывающие основные архитектурные особенности современных информационных технологий.

Таким образом, результаты проведенного авторами исследования говорят об очевидной показательности и представительности ОК для того, чтобы их использовать в основе информационного моделирования. Тот факт, что требования ОК классифицированы, также добавляет уверенности в перспективности ОК как хорошей основы для информационного моделирования.

Возможности и перспективы применения Общих критериев

Международный стандарт ISO/IEC 15408 (русский аутентичный аналог ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408)^[6] состоит из трех частей:

- первая часть описывает концепцию применения ОК;
- во второй части рассмотрены функциональные требования безопасности для ИТ;
- в третьей части стандарта представлены требования доверия к безопасности, описывающие меры, которые должны быть выполнены для того, чтобы изделия ИТ могли безопасно функционировать; эти меры связаны с безопасным проектированием изделия ИТ, безопасной разработкой, тестированием, поставкой, инсталляцией и т.д., а также требуют проведения испытаний изделия ИТ и подготовки документов – свидетельств разработки, испытаний и оценки изделия ИТ.

^[3]Требования к средствам антивирусной защиты. Утверждены 20 марта 2012 г. Федеральной службой по техническому и экспортному контролю России.

^[4]Требования к системам обнаружения вторжений. Утверждены 6 декабря 2011 г. Федеральной службой по техническому и экспортному контролю России.

^[5]Требования к средствам доверенной загрузки. Утверждены 27 сентября 2013 г. Федеральной службой по техническому и экспортному контролю России.

^[6]ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1-2008. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий.

В Общих критериях существуют такие понятия, как профиль защиты (ПЗ) и задание по безопасности (ЗБ). ПЗ и ЗБ – это документы, в которых описаны требования к объекту оценки (к некоторому изделию ИТ). В ПЗ в наиболее общем виде предъявляются требования для типа изделия, а в ЗБ в подробном виде описываются конкретные требования для конкретного изделия ИТ.

Авторы предлагают описывать ПЗ и ЗБ в виде информационных моделей, основанных на известной методологии *Integrated DEFinition (IDEF)*.

Сопоставление основных принципов обеспечения безопасности ПО и требований доверия к безопасности (ТДБ) из ОК по наивысшему 7-му оценочному уровню доверия к безопасности (ОУД7)

Общие критерии		Современные принципы обеспечения безопасности ПО
Классы ТДБ из ОК (с их краткими именами)	Компоненты ТДБ из ОК	
1	2	3
АСМ: Управление конфигурацией (УК)	Полная автоматизация УК	Статистический учет и ведение системных журналов во всех процессах разработки ПО с целью контроля технологической безопасности
	Расширенная поддержка УК с поэтапным контролем разработок	Последовательная многоуровневая фильтрация программных модулей – процедура осуществляется в процессе создания модулей с применением функционального дублирования разработок и поэтапного контроля
	Охват УК инструментальных средств разработки	Использование только сертифицированных и выбранных в качестве единых инструментальных средств разработки программ для новых технологий обработки информации и перспективных архитектур вычислительных систем
ADO: Поставка и эксплуатация	Предотвращение модификации при поставке	–
	Процедуры установки, генерации и запуска	–
ADV: Разработка	Формальная функциональная спецификация	–
	Формальный проект верхнего уровня	–
	Структурированная реализация функций безопасности	Достижение технологической безопасности ПО в процессе его разработки – обеспечивается за счет реализации процедур и мероприятий
	Минимизация сложности	Достаточность защищенности программ – отражает необходимость поиска наиболее эффективных и надежных мер безопасности при одновременной минимизации их стоимости
	Полуформальный проект нижнего уровня	–
	Формальная демонстрация соответствия спецификации	–
	Формальная модель политики безопасности объекта оценки	Заблаговременность разработки средств обеспечения безопасности и контроля производства ПО – заключается в предупредительном характере мер обеспечения технологической безопасности работ в интересах недопущения снижения эффективности системы безопасности процесса создания ПО
AGD: Руководства	Руководства администратора	Документируемость технологии создания программ – подразумевает разработку пакета нормативно-технических документов по контролю программных средств на наличие преднамеренных дефектов
	Руководство пользователя	

1	2	3
ALC: Поддержка жизненного цикла	Достаточность мер безопасности Измеримая модель жизненного цикла Соответствие всех частей объекта оценки стандартам реализации	Планируемость применения средств безопасности программ – предполагает перенос акцента на совместное системное проектирование ПО и средств его безопасности, планирование их использования в предполагаемых условиях эксплуатации – –
ATE: Тестирование	Строгий анализ покрытия тестами Тестирование на уровне реализации Упорядоченное функциональное тестирование Полное независимое тестирование	– Регламентация технологических этапов разработки ПО – включает упорядоченные фазы промежуточного контроля, спецификацию программных модулей и стандартизацию функций и формата представления данных Обеспечение технологической безопасности на этапах стендовых и приемосдаточных испытаний за счет реализации процедур и мероприятий –
AVA: Оценка уязвимостей	Систематический анализ открытых каналов нарушения безопасности Анализ и тестирование опасных состояний Оценка стойкости функций безопасности Стойкость алгоритмов шифрования	Обоснованность средств обеспечения безопасности ПО – заключается в глубоком научно-обоснованном подходе к принятию проектных решений по оценке степени безопасности, прогнозированию угроз безопасности, всесторонней априорной оценке показателей средств защиты Автоматизация средств контроля управляющих и вычислительных программ – обеспечивается проверкой и поиском на наличие в ПО преднамеренных дефектов Гибкость управления защитой программ – требует от системы контроля и управления обеспечением безопасности ПО способности к диагностированию, опережающей нейтрализации, оперативному и эффективному устранению возникающих угроз –
Это требование нужно отнести ко всем перечисленным выше требованиям ОК		Комплексность обеспечения безопасности ПО – предполагает рассмотрение проблемы безопасности информационно-вычислительных процессов с учетом всех структур КС, возможных каналов утечки информации и несанкционированного доступа к ней, времени и условий их возникновения, комплексного применения организационных и технических мероприятий
–		Блокирование несанкционированного доступа соисполнителей и абонентов государственных и негосударственных сетей связи, подключенных к стандам для разработки программ
–		Типизация алгоритмов, программ и средств информационной безопасности – обеспечивается информационной, технологической и программной совместимости на основе максимальной их унификации по всем компонентам и интерфейсам
–		Централизованное управление базами данных проектов ПО и администрирование технологии их разработки – обеспечивается жестким разграничением функций, ограничением доступа в соответствии со средствами диагностики, контроля, защиты

Предлагаемые особенности моделирования процессов обеспечения безопасности информации следующие. Каждый прямоугольник в модели означает некое действие в процессе функционирования моделируемой системы или в нашем случае это может быть описание действий с информационными потоками, необходимых для реализации того или иного требования по безопасности. Далее каждый прямоугольник может декомпозироваться, представляя некоторые поддействия со своими взаимосвязями. Таким образом, моделирование состоит из процессов декомпозиции действий и объединяющих их связей до необходимого уровня.

На рис. 1 приведена диаграмма информационной модели (в данном случае для системы защиты персональных данных), а вся модель показывает всю среду безопасности для данной системы и, кроме того, всю среду функционирования через моделирование потоков данных (бизнес-процессов) – чего нет в Общих критериях.

В модели на входе в любой прямоугольник (его левая сторона) стрелочкой указан поток информации, с которым будет производиться какое-либо действие, указанное в прямоугольнике. Информационная стрелка может входить в прямоугольник и сверху: в таком случае информация является управляющей для данного действия и может не обрабатываться соответствующим действием, а использоваться для осуществления этого действия. В качестве управляющих потоков для действия в прямоугольнике используется информация о предположениях, политиках и угрозах, указанная стрелками, которые входят в прямоугольник сверху. На выходе прямоугольника (его правая сторона) представлены выходящие стрелки, определяющие информацию на выходе. Связи на входе и на выходе между прямоугольниками являются зависимостями между требованиями, которые также предусматриваются стандартом ISO/IEC 15408. Кроме того, зависимости определяют информационные потоки в системе.

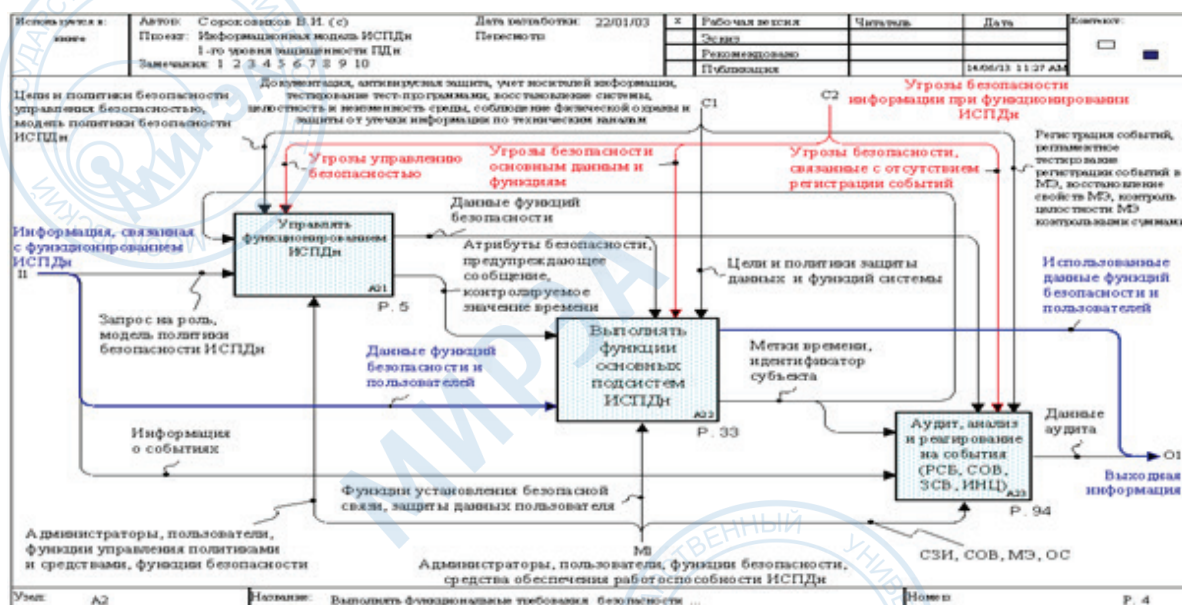


Рис. 1. Пример диаграммы информационной модели.

Методика моделирования безопасности изделий ИТ [3], основанная на вышеизложенном подходе и применении методологии IDEF, позволяет наглядно описывать и даже проектировать системы безопасности. Предлагаемая методика основана на описании всех наиболее значимых аспектов безопасности изделий ИТ в виде взаимосвязанной информационной модели.

Кроме информации из Общих критериев, информационное моделирование позволяет рассмотреть все аспекты среды функционирования объекта оценки. Моделирование более наглядно, представительно, а разрабатываемые модели более удобны в работе, чем обычная текстовая информация. На рис. 2 показано, как модели отражают в себе требования профилей защиты и заданий по безопасности на основе Общих критериев.

На основе предлагаемого моделирования [3], фактически заменяя дорогие натурные испытания испытаниями на моделях, удобно создавать киберполигоны для сборки моделей больших систем из моделей отдельных технологий, проводить их исследования на надежность, живучесть, осуществлять выявление «узких мест». Такой киберполигон будет удобен, например, для обучения студентов и для отработки учебно-тренировочных средств в области обеспечения информационной безопасности.

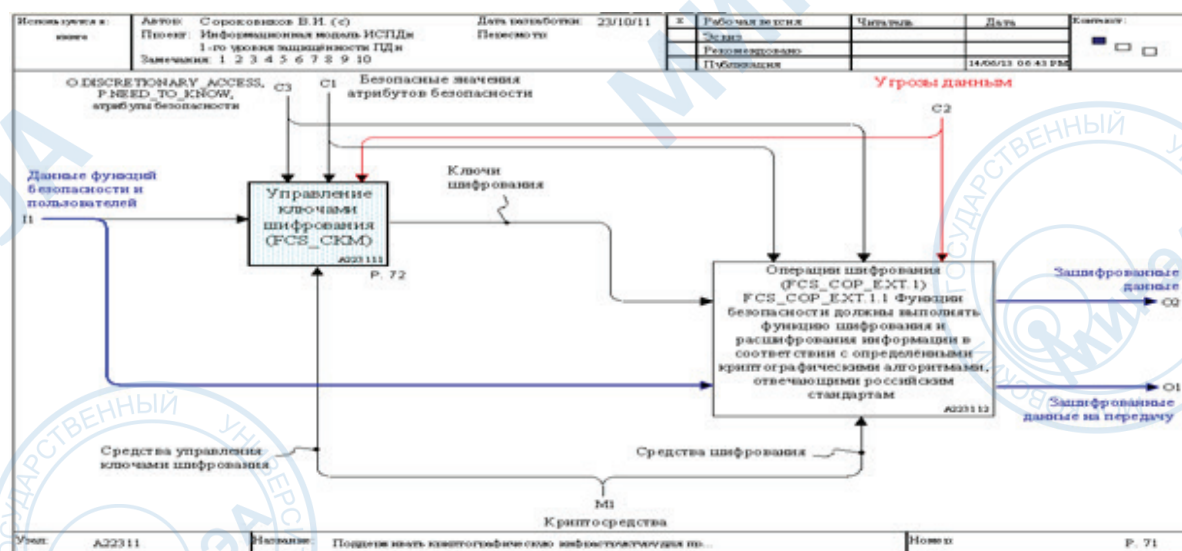


Рис. 2. Пример диаграммы информационной модели, в которой отражены требования Общих критериев.

Заключение

Информационное моделирование является значимым и удобным средством для представления информации. Схемы, представленные в статье, несут в себе более воспринимаемую специалистом информацию, чем если бы она была описана в текстовом виде. Они показывают движение информации в ИТ и среду безопасности информации (угрозы, политики безопасности информации), а также являются более информационно-емкими, наглядными и представительными. Классифицированные, иерархические и взаимосвязанные требования Общих критериев легко описываются схемами информационного моделирования (можно сказать, что просто предназначены для этого). Гибкость ОК и их ориентированность на архитектуры современных ИТ обобщает опыт работы в области безопасности информации и предоставляет возможность для перспективного развития этого опыта. ОК – не только гибкий аппарат обеспечения безопасности информации, охватывающий большинство принципов современных ИТ, но и удобная платформа для мо-

делирования ИТ. Моделирование основ ИТ на базе ОК позволит применять модульный принцип для моделирования и предъявления требований безопасности информации для сложных ИТ.

Литература:

1. Набатов Д.В. Информационное сопровождение программного обеспечения // Научная перспектива. 2015. № 6. С. 14–19.
2. Девянин П.Н. Модели безопасности компьютерных систем. Управление доступом и информационными потоками. М.: Горячая линия – Телеком, 2013. 339 с.
3. Сороковиков В.И. Моделирование процессов обеспечения безопасности в операционных системах. М., 2009. 268 с.
4. Кияев В., Граничин О. Безопасность информационных систем. М.: Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ», 2016. 192 с.
5. Мэйволд Э. Безопасность сетей. М.: Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ», 2016. 572 с.
6. Скрипник Д.А. Общие вопросы технической защиты информации. М.: Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ», 2016. 425 с.
7. Загинайлов Ю.Н. Основы информационной безопасности. М.: Директ-Медиа, 2015. 105 с.
8. Долозов Н.Л., Гульятеева Т.А. Программные средства защиты информации. Новосибирск: НГТУ, 2015. 63 с.
9. Лапониная О.Р. Протоколы безопасного сетевого взаимодействия. М.: Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ», 2016. 462 с.
10. Загинайлов Ю.Н. Теория информационной безопасности и методология защиты информации. М.: Директ-Медиа, 2015. 253 с.
11. Информационная безопасность и защита информации на железнодорожном транспорте: учебник / под ред. А.А. Корниенко. М: УМЦ ЖДТ (Маршрут), 2014. 440 с.

УДК: 536.521.2

МЕТОД БЕСКОНТАКТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТОВ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

В.К. Битюков[@], д.т.н., заведующий кафедрой, профессор

А.Н. Жуков, аспирант, ассистент

Д.С. Симачков, старший преподаватель

*Кафедра теоретической радиотехники и радиофизики,
Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: bitukov@mirea.ru*

Представлена достаточно подробная библиография по методам бесконтактного определения температуры поверхности объектов. Отмечено, что проблеме пирометрии температур, не превышающих 700 К, посвящено чрезвычайно мало исследований, хотя их практическая потребность важна в радиоэлектронике, медицине, строительстве и других отраслях науки и техники. На рынке современного приборного обеспечения имеется большое число отечественных и импортных оптико-электронных систем (ОЭС), пригодных для этих целей. Однако, получаемые с помощью современных ОЭС результаты, как правило, требуют серьезного критического анализа, а иногда являются просто ошибочными. Чаще всего это связано с отсутствием учета или некорректным учетом спектральной зависимости характеристик ОЭС, оптико-физических параметров контролируемого объекта и окружающего его фона. Предложена процедура пирометрии объектов с помощью ОЭС (пирометры, тепловизоры), включающая планарное расположение в поле зрения ОЭС исследуемого объекта, нормальная спектральная излучательная способность поверхности которого известна, и эталонного излучателя, нормальная спектральная излучательная способность которого также известна, а его температура регулируется и измеряется. Для режима равенства полных тепловых потоков объекта и эталонного излучателя предложена математическая модель процесса, позволяющая определить искомое значение температуры поверхности объекта. Методом малых возмущений был выполнен метрологический анализ предложенного метода определения температуры объекта при использовании монохроматической ОЭС. Суть метода малых возмущений состоит в следующем. Вначале на основании выбранных значений параметров вычисляют по соответствующей формуле значение искомой величины. Затем изменяют значение только одного из используемых при расчете параметров на величину его погрешности и проводят новый расчет значения искомой величины. Отклонение полученного значения от исходного и характеризует влияние неточности знания варьируемого параметра на искомую величину. В табличной форме приведены результаты расчетов для длин волн, равных 0.50, 2.0, 5.0, 8.0, 14 и 50 мкм; температурах, равных 400, 700 и 1000 К; нормальных спектральных излучательных способностях объекта, равных 0.1, 0.5 и 0.9; температуре фона, равной 300 К; нормальной спектральной излучательной способности фона, равной 0.5,

и эталонного излучателя, равной 0.98. Показано, что комплексный анализ процесса определения температуры – основного информационного параметра как технологического процесса изготовления объектов, так и их теплового состояния на всех этапах жизненного цикла, должен предшествовать не только процессу измерения температуры поверхности объекта, но и процедуре выбора ОЭС для его реализации. Только в этом случае полученные результаты могут считаться достоверными с установленной реальной погрешностью измерений.

Ключевые слова: метод пирометрии, приборное обеспечение, бесконтактное определение температуры, поверхность объекта, метод малых возмущений, погрешность, монохроматическая оптико-электронная система, результаты расчетов, основной информационный параметр, достоверность результатов.

A METHOD OF CONTACTLESS MEASUREMENT OF SURFACE TEMPERATURE OF RADIO ELECTRONIC OBJECTS

V.K. Bityukov@,
A.N. Zhukov,
D.S. Simachkov

Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia
@Corresponding author e-mail: bitukov@mirea.ru

There exists quite an extensive bibliography on the methods of contactless measurement of temperature of the surfaces of objects. However, very few works have been devoted to studying the pyrometry of temperatures not exceeding 700 K, though these are badly needed for practical application in radio electronics, medicine, construction and other fields of science and technology. The market of modern measuring devices has plenty of domestic and foreign-made optoelectronic systems (OESs) which can be used for these purposes. However, the results obtained with the help of modern OESs in most cases need to be thoroughly analysed, for sometimes they may appear to be wrong. Most often errors occur due to unaccounted or incorrect account of spectral dependence of OES characteristics, opticophysical parameters of the object under control and its background. A procedure for the pyrometry of objects (pyrometers, thermal imagers), using OESs, is proposed, which includes planar arrangement within the view of OES of the object under investigation, the normal spectral emissivity of the surface of which is known, and a reference transmitter, the normal spectral emissivity of which is also known, and its temperature is controlled and measured. A mathematical model of the process is suggested for the mode when full heat flows of the object and the reference transmitter are equal, allowing to define the target temperature value of the object surface. Applying the method of small perturbations, a metrological analysis is made of the proposed method for determining of the temperature of the object with the use of a monochromatic OES. The method of small perturbations can be described as follows: first, based on the selected values of the parameters, using the corresponding formula, calculation is made of the value of the sought quantity. Then, the value of only one of the parameters used in the calculation is changed for the value of its measurement error, and a new calculation is made of the target value. The deviation of the obtained value from the original value characterizes the impact of inaccurate knowledge of the variable parameter on the target value. The table gives the results of calculations of

wavelengths of 0.50, 2.0, 5.0, 8.0, 14 and 50 microns; of temperatures of 400, 700 and 1000 K; of normal spectral emissivity of the object of 0.1, 0.5 and 0.9; of the background temperature of 300 K; of normal spectral background emissivity of 0.5 and reference emitter of 0.98. It can be seen that a comprehensive analysis of the process of temperature measurement, the main information parameter of both the technological process of the manufacturing of objects and their thermal condition at all stages of the life-cycle, should precede both the measurement of the object surface temperature, and also the selection procedure of OES for its realization. Only obtained in this way the results can be considered reliable with the determined real measurement error. Keywords: test bench, integrated circuit chip, characteristics, algorithm, charge pump, control program, virtual panel.

Key words: pyrometry method, assurance of measuring devices, contactless measurement of temperature, object surface, method of small disturbances/perturbations, error, monochromatic optico-electronic systems, calculation results, basic information parameter, credibility of measurement results.

Введение

Температура T – важнейший информационный параметр, характеризующий технологический процесс изготовления объектов и их тепловое состояние на всех этапах его жизненного цикла [1, 2]. В свою очередь, основным параметром, характеризующим тепловое излучение объекта, помимо температуры T , величина которой на поверхности объектов радиоэлектроники, как правило, не превышает 450 K, является его нормальная спектральная излучательная способность ε_λ . Здесь и далее индекс « λ » указывает на спектральную зависимость соответствующего параметра, а λ – длина волны электромагнитного излучения. При этом температура окружающего объект фона изменяется от ~ 273 до ~ 400 K. Отсюда при измерениях температуры возможно возникновение ситуации, когда собственный поток излучения $\Phi_{\text{соб}}$ объекта и отраженный от объекта поток излучения $\Phi_{\text{отр}}$ окружающего его фона соизмеримы.

Вопросу бесконтактного определения температуры поверхности объектов уделяется большое внимание. В экспериментальной практике и промышленных технологиях нашли применение различные методы пирометрии, подробно изложенные в [3–20], но касающиеся, как правило, определения средних и высоких температур, то есть $T > 700$ K. Проблеме пирометрии при $T < 700$ K посвящено значительно меньшее число исследований [1, 2, 20–24], хотя практическая потребность в бесконтактном измерении температур названного уровня чрезвычайно важна в радиоэлектронике, медицине, строительстве и других наукоемких технологиях. Более того, на рынке приборного обеспечения бесконтактного определения температуры поверхности объектов имеется большое число отечественных и импортных оптико-электронных приборов, пирометрических и тепловизионных систем, пригодных для этих целей. Общая тенденция развития оптико-электронного приборостроения состоит в интеллектуализации оптико-электронных систем (ОЭС). Это позволяет уменьшить влияние человеческого фактора на получаемые результаты и, естественно улучшить их метрологические параметры. В то же время эти результаты зачастую требуют серьезного критического анализа, что чаще всего связано с отсутствием учета или некорректным учетом оптико-физических параметров контролируемого объекта и окружающего его фона.

Надо отметить, что в последние 40 лет активно и успешно развиваются методы спектральной пирометрии объектов при отсутствии априорных данных об их излучательной способности [3, 4].

Переход от качественного к количественному контролю, что эквивалентно переходу от поля излучения по поверхности объекта к полю температуры по его поверхности, связан с необходимостью решения, по крайней мере, четырех задач:

- 1) методическое обеспечение процедуры определения температуры поверхности объектов радиоэлектроники с соответствующим метрологическим анализом;
- 2) получение информации о спектральной нормальной излучательной способности ε_λ объекта и окружающего его фона во всем спектральном диапазоне $\lambda_1 - \lambda_2$ ОЭС;
- 3) учет влияния органических лаков, покрывающих поверхность многих объектов радиоэлектроники, частично прозрачных для теплового излучения, на погрешность определения температуры поверхности бесконтактным методом [5, 6];
- 4) измерение температур, соизмеримых с температурой фона, с учетом влияния теплового излучения фона на результаты экспериментов: например, в [25] отмечена типичная методическая погрешность пирометрии объекта, расположенного внутри печи и нагреваемого сгорающим внутри печи газом.

Решению первой задачи и посвящена данная работа.

Метод определения температуры поверхности объекта

Пусть в поле зрения оптико-электронной системы планарно установлены исследуемый объект, нормальная спектральная излучательная способность ε_λ поверхности которого известна, и эталонный излучатель (ЭИ), нормальная спектральная излучательная способность ε_0 которого известна, а его температура T_0 регулируется и измеряется [1]. Отметим, что объект и ЭИ размещены в специальной камере. Такая ситуация реализуется как в промышленных технологических процессах, например, при отжиге изделий в печах [16], так и в экспериментальной практике, в частности, при определении коэффициента теплопроводности [17]. Схема экспериментального стенда показана на рис. 1. ОЭС может находиться в двух фиксированных положениях, обеспечивающих регистрацию излучения по нормали к плоскости расположения объекта и эталонного излучателя. Внутренняя поверхность камеры имеет нормальную спектральную излучательную способность ε_ϕ и температуру T_ϕ . Установив требуемый режим работы объекта, при котором необходимо определить температуру T его поверхности, изменяют температуру T_0 ЭИ до достижения равенства полных тепловых потоков объекта Φ и эталонного излучателя Φ_0 , после этого измеряют температуры T_0 и T_ϕ . Затем по соответствующей формуле вычисляют искомое значение температуры поверхности объекта.

В качестве эталонного излучателя, как правило, используется модель абсолютно черного тела (АЧТ).

Полный тепловой поток Φ объекта равен сумме собственного $\Phi_{\text{соб}}$ и отраженного $\Phi_{\text{отр}}$ потоков, то есть:

$$\Phi = \Phi_{\text{соб}} + \Phi_{\text{отр}}. \quad (1)$$

Собственный тепловой поток объекта $\Phi_{\text{соб}}$, определяемый законом излучения Планка, формирует на выходе оптико-электронной системы электрический сигнал $U_{\text{соб}}$, равный

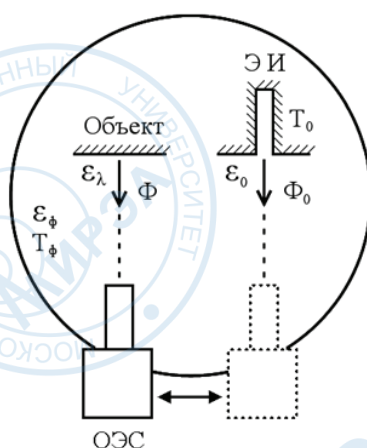


Рис. 1. Схема стенда для реализации метода определения температуры поверхности объектов радиоэлектроники по собственному инфракрасному излучению.

$$U_{cob} = k \cdot \Phi_{cob} = k \cdot f \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda} \cdot \frac{C_1 \cdot \tau_{\lambda} \cdot S_{\lambda}}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} \cdot d\lambda, \quad (2)$$

где k – коэффициент усиления ОЭС;

f – конструктивный параметр ОЭС;

τ_{λ} – пропускание оптической системы ОЭС и среды, находящейся между объектом и ОЭС;

S_{λ} – вольт-ваттная чувствительность приемника излучения;

C_1 и C_2 – первая и вторая постоянные Планка.

Отраженный от объекта тепловой поток Φ_{omp} , определяемый спектральным коэффициентом отражения объекта, эффективной излучательной способностью ε_{ϕ} фона и его температурой T_{ϕ} , формирует на выходе ОЭС электрический сигнал U_{omp} , равный

$$U_{omp} = k \cdot \Phi_{omp} = k \cdot f \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\phi} \cdot (1 - \varepsilon_{\lambda}) \cdot \frac{C_1 \cdot \tau_{\lambda} \cdot S_{\lambda}}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T_{\phi}}} - 1 \right)} \cdot d\lambda. \quad (3)$$

Тогда суммарный электрический сигнал U на выходе ОЭС в соответствии с (1)–(3) при регистрации полного потока излучения объекта равен

$$U = k \cdot f \cdot C_1 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{\lambda} \cdot S_{\lambda}}{\lambda^5} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{\lambda}}{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1} + \frac{\varepsilon_{\phi} \cdot (1 - \varepsilon_{\lambda})}{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T_{\phi}}} - 1} \right) \cdot d\lambda. \quad (4)$$

Аналогично уравнению (4) при регистрации полного теплового потока излучения эталонного излучателя, имеющего температуру T_0 , выражение для электрического сигнала U_0 на выходе ОЭС имеет вид

$$U_0 = k \cdot f \cdot C_1 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_\lambda \cdot S_\lambda}{\lambda^5} \cdot \left(\frac{\varepsilon_0}{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T_0}} - 1} + \frac{\varepsilon_\phi \cdot (1 - \varepsilon_0)}{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T_\phi}} - 1} \right) \cdot d\lambda. \quad (5)$$

В соответствии с требованием предложенного метода выражения (4) и (5) должны быть равными. Это позволяет получить

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_\lambda \cdot S_\lambda}{\lambda^5} \cdot \left(\frac{\varepsilon_0}{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T_0}} - 1} - \frac{\varepsilon_\lambda}{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1} - \frac{\varepsilon_\phi \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_\lambda)}{e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T_\phi}} - 1} \right) \cdot d\lambda = 0. \quad (6)$$

При практической реализации метода выполнение условия равенства выражений (4) и (5) удобно контролировать на экране видеоконтрольного устройства ОЭС в режиме с включенной изотермой. Полученное выражение (6) является уравнением предложенного метода и позволяет определить температуру T поверхности объекта. Аналитически решить уравнение (6) в общем виде не представляется возможным, так как оптико-физические свойства объекта, фона и эталонного излучателя имеют индивидуальный характер.

Уравнение метода определения температуры поверхности объекта при использовании монохроматической ОЭС

Для монохроматического излучения уравнение (6) приобретает следующий вид

$$\frac{\varepsilon_0}{\frac{C_2}{e^{\lambda \cdot T_0}} - 1} - \frac{\varepsilon_\lambda}{\frac{C_2}{e^{\lambda \cdot T}} - 1} - \frac{\varepsilon_\phi \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_\lambda)}{\frac{C_2}{e^{\lambda \cdot T_\phi}} - 1} = 0. \quad (7)$$

После соответствующих преобразований из уравнения (7) получают выражение для искомой температуры T объекта

$$T = \frac{C_2}{\lambda \cdot \ln \left(1 + \frac{\varepsilon_\lambda}{\frac{\varepsilon_0}{\frac{C_2}{e^{\lambda \cdot T_0}} - 1} - \frac{\varepsilon_\phi \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_\lambda)}{\frac{C_2}{e^{\lambda \cdot T_\phi}} - 1}} \right)}. \quad (8)$$

Применение метода малых возмущений для метрологического анализа предложенного метода

Методом малых возмущений [26] выполнен метрологический анализ предложенного метода определения температуры объекта при использовании монохроматической ОЭС.

Суть метода малых возмущений достаточно проста. Вначале на основании выбранных значений параметров по соответствующей формуле вычисляют значение искомой величины, например, T . Затем изменяют значение только одного из используемых при расчете параметров, например, i -го, на величину его погрешности и проводят расчет значения искомой величины. Полученное значение T'_i характеризует влияние на T неточности

знания только i -го параметра. Величина $\delta T_i = \frac{(T'_i - T)}{T} \cdot 100\%$ является количественной мерой

влияния i -го параметра на погрешность определения T .

При анализе влияния $(i+1)$ -го параметра на погрешность определения T значение i -го параметра возвращалось к исходному, а изменялось значение только $(i+1)$ -го параметра на величину его погрешности. Далее проводили расчет значения искомой величины. Полученное значение T'_{i+1} характеризует влияние на T неточности знания только $i+1$ -го па-

раметра. Величина $\delta T_{i+1} = \frac{(T'_{i+1} - T)}{T} \cdot 100\%$ является количественной мерой влияния $i+1$ -го параметра на погрешность определения T .

Такую процедуру выполняли для всех параметров, определяющих метрологию анализируемого процесса.

Температура эталонного излучателя T_0 , в отличие от других перечисленных параметров, по условиям метода должна определяться экспериментально в условиях измерения температуры поверхности T объекта. По этой причине предварительно для метрологического анализа бесконтактного метода определения температуры объекта T по формуле (8) принимали, что она (температура объекта), как и другие параметры, известна, а неизвестной является только температура эталонного излучателя T_0 , которую и вычисляли.

Затем полученное значение T_0 использовали для определения T по уравнению (8) при сохранении неизменными значений остальных параметров.

При найденном значении температуры эталонного излучателя T_0 и выбранных остальных параметрах определяли T . Естественно, что значение T совпадало со значением температуры объекта, принятого при вычислении T_0 . Это совпадение является подтверждением правильности решения уравнения (8) относительно T и T_0 . Затем, изменяя значение лишь одного из параметров на величину его погрешности, вычисляли новое значение температуры объекта T'_i .

В табл. 1–3 приведены результаты расчетов. Они выполнены при следующих параметрах: $C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$ – вторая постоянная Планка; длинах волн λ , равных 0.50, 2.0, 5.0, 8.0, 14 и 50 мкм; температурах T , равных 400, 700 и 1000 К; нормальных спектральных излучательных способностях ϵ_λ объекта, равных 0.1, 0.5 и 0.9; температуре фона T_ϕ , равной 300 К; нормальная спектральная излучательная способность фона ϵ_ϕ равна 0.5; нормальная спектральная излучательная способность эталонного излучателя ϵ_0 равна 0.98.

Значения погрешности этих параметров выбраны следующие: относительные погрешности $\delta\varepsilon_\lambda=5\%$; $\delta T_0=0.1\%$; абсолютные погрешности равны $\Delta\varepsilon_0 = -0.05$; $\Delta\varepsilon_\phi = 0.1$; $\Delta T_\phi = 0.5$ К. При расчете δT_λ для $\lambda = 0.50$ мкм абсолютную погрешность $\Delta\lambda$ выбирали равной $\Delta\lambda=0.01$ мкм, а при $\lambda=2.0$ мкм – $\Delta\lambda=0.1$ мкм. Для остальных длин волн абсолютная погрешность их знания принята $\Delta\lambda=0.2$ мкм.

Таблица 1. Оценка погрешностей определения температуры поверхности объекта, связанных с неточностью знания экспериментально измеряемых параметров и используемых оптико-физических параметров (при монохроматическом излучении 0.50 и 2.0 мкм)

λ , мкм	T , К	ε_λ	T_0 , К	$\delta T_{\varepsilon_\lambda}$, % ($\delta\varepsilon_\lambda = 5\%$)	δT_{ε_0} , % ($\Delta\varepsilon_0 = -0.05$)	δT_{T_0} , % ($\delta T_0 = 0.1$)	$\delta T_{\varepsilon_\phi}$, % ($\Delta\varepsilon_\phi = 0.1$)	δT_{T_ϕ} , % ($\Delta T_\phi = 0.5$ К)	δT_λ , % ($\Delta\lambda = 0.01$ мкм $\Delta\lambda = 0.1$ мкм)	θ , %
0.50	1000	0.1	926.82	-0.17	-0.17	0.11	0	0	0.80	0.92
		0.5	977.49	-0.17	-0.17	0.10	0	0	0.23	0.39
		0.9	997.40	-0.17	-0.17	0.10	0	0	0.03	0.29
	700	0.1	663.34	-0.12	-0.12	0.11	0	0	0.56	0.65
		0.5	688.89	-0.12	-0.12	0.10	0	0	0.16	0.28
		0.9	698.73	-0.12	-0.12	0.10	0	0	0.02	0.22
	400	0.1	387.75	-0.07	-0.07	0.10	0	0	0.32	0.38
		0.5	396.35	-0.07	-0.07	0.10	0	0	0.09	0.18
		0.9	399.58	-0.07	-0.07	0.10	0	0	0.01	0.15
2.0	1000	0.1	760.03	-0.67	-0.70	0.13	0	0	3.25	3.78
		0.5	915.7	-0.67	-0.70	0.11	0	0	0.92	1.48
		0.9	989.7	-0.67	-0.70	0.10	0	0	0.10	1.08
	700	0.1	573.26	-0.47	-0.49	0.12	0	0	2.26	2.60
		0.5	657.60	-0.47	-0.49	0.11	0	0	0.65	1.04
		0.9	694.94	-0.47	-0.49	0.10	0	0	0.07	0.76
	400	0.1	355.32	-0.27	-0.28	0.11	0.01	0	1.25	1.44
		0.5	385.81	-0.27	-0.28	0.10	0	0	0.36	0.60
		0.9	398.34	-0.27	-0.28	0.10	0	0	0.04	0.44

Суммарную систематическую погрешность θ определения температуры поверхности объекта при доверительной вероятности 0.95 рассчитывали по формуле [27]:

$$\theta = 1,1 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m (\delta T_i)^2}, \% \quad (9)$$

где m – число варьируемых параметров.

Информация, приведенная в табл. 1–3 и содержащая результаты метрологического расчета параметров предложенного бесконтактного метода определения температуры поверхности объекта, позволяет сделать ряд выводов, которые необходимо учитывать при практической реализации метода.

Погрешности $\delta\varepsilon_\lambda$ и $\delta T_{\varepsilon_\lambda}$ имеют разные знаки, причем для рассмотренных длин волн пирометрии с ростом измеряемой температуры объекта значение $\delta T_{\varepsilon_\lambda}$ также возрастает и не зависит от значения ε_λ (при одном и том же значении $\delta\varepsilon_\lambda = 5\%$). Так, при $\lambda = 5.0$ мкм (эта длина волны используется в пирометрах для измерения температуры различных стекол) $\delta\varepsilon_\lambda = 5\%$ приводит к $\delta T_{\varepsilon_\lambda} = 1.6\%$ на уровне 1000 К и 0.6% – при $T=400$ К. Такое соотношение наблюдается для всех рассмотренных длин волн.

Таблица 2. Оценка погрешностей определения температуры поверхности объекта, связанных с неточностью знания экспериментально измеряемых параметров и используемых оптико-физических параметров (при монохроматическом излучении: 5.0 и 8.0 мкм)

λ , мкм	T, K	ε_λ	T_0 , K	$\delta T_{\varepsilon_\lambda}$, % ($\delta \varepsilon_\lambda = 5$)	δT_{ε_0} , % ($\Delta \varepsilon_0 = -0.05$)	δT_{T_0} , % ($\delta T_0 = 0.1$)	$\delta T_{\varepsilon_\phi}$, % ($\Delta \varepsilon_\phi = 0.1$)	δT_{T_ϕ} , % ($\Delta T_\phi = 0.5$ K)	δT_λ , % ($\Delta \lambda = 0.2$ мкм)	θ , %
5.0	1000	0.1	565.01	-1.58	-1.67	0.17	0.03	0	2.73	3.93
		0.5	819.33	-1.58	-1.67	0.12	0	0	0.74	2.66
		0.9	976.00	-1.58	-1.67	0.10	0	0	0.08	2.53
	700	0.1	453.13	-1.15	-1.21	0.15	0.09	0.01	2.06	2.93
		0.5	604.07	-1.15	-1.21	0.12	0.01	0	0.59	1.96
		0.9	687.69	-1.15	-1.21	0.10	0	0	0.07	1.85
	400	0.1	315.09	-0.64	-0.67	0.18	1.13	0.09	0.98	1.95
		0.5	368.24	-0.64	-0.67	0.11	0.12	0.01	0.30	1.09
		0.9	396.07	-0.64	-0.67	0.10	0.01	0	0.03	1.03
8.0	1000	0.1	466.21	-2.21	-2.36	0.19	0.51	0.03	1.94	4.19
		0.5	758.15	-2.21	-2.36	0.12	0.05	0	0.51	3.60
		0.9	966.43	-2.21	-2.36	0.10	0	0	0.05	3.56
	700	0.1	386.92	-1.70	-1.81	0.19	0.95	0.05	1.57	3.40
		0.5	565.44	-1.70	-1.81	0.12	0.10	0.01	0.44	2.78
		0.9	681.88	-1.70	-1.81	0.10	0.01	0	0.05	2.73
	400	0.1	295.57	-0.94	-1.00	0.26	4.50	0.21	0.91	5.28
		0.5	355.78	-0.94	-1.00	0.12	0.46	0.02	0.24	1.62
		0.9	394.24	-0.94	-1.00	0.10	0.04	0	0.03	1.51

Таблица 3. Оценка погрешностей определения температуры поверхности объекта, связанных с неточностью знания экспериментально измеряемых параметров и используемых оптико-физических параметров (при монохроматическом излучении: 14 и 50 мкм)

λ , мкм	T, K	ε_λ	T_0 , K	$\delta T_{\varepsilon_\lambda}$, % ($\delta \varepsilon_\lambda = 5$)	δT_{ε_0} , % ($\Delta \varepsilon_0 = -0.05$)	δT_{T_0} , % ($\delta T_0 = 0.1$)	$\delta T_{\varepsilon_\phi}$, % ($\Delta \varepsilon_\phi = 0.1$)	δT_{T_ϕ} , % ($\Delta T_\phi = 0.5$ K)	δT_λ , % ($\Delta \lambda = 0.2$ мкм)	θ , %
14	1000	0.1	381.50	-2.89	-3.12	0.23	3.29	0.10	0.99	6.02
		0.5	695.18	-2.89	-3.12	0.12	0.35	0.01	0.24	4.70
		0.9	956.09	-2.89	-3.12	0.10	0.03	0	0.02	4.68
	700	0.1	328.81	-2.37	-2.54	0.26	5.17	0.15	0.92	6.93
		0.5	522.19	-2.37	-2.54	0.13	0.55	0.02	0.23	3.88
		0.9	674.84	-2.37	-2.54	0.10	0.05	0	0.02	3.82
	400	0.1	272.70	-1.37	-1.47	0.38	13.69	0.38	0.84	15.26
		0.5	339.45	-1.37	-1.47	0.14	1.38	0.04	0.17	2.69
		0.9	391.64	-1.37	-1.47	0.10	0.11	0	0.02	2.22
50	1000	0.1	289.58	-3.71	-4.01	0.26	15.68	0.20	0.16	18.27
		0.5	620.97	-3.71	-4.01	0.12	1.69	0.02	0.02	6.30
		0.9	943.76	-3.71	-4.01	0.10	0.14	0	0	6.02
	700	0.1	256.00	-3.29	-3.56	0.32	22.63	0.29	0.20	25.46
		0.5	464.15	-3.29	-3.56	0.13	2.44	0.03	0.03	5.97
		0.9	665.10	-3.29	-3.56	0.10	0.20	0	0	5.34
	400	0.1	221.97	-2.29	-2.47	0.49	41.48	0.53	0.29	46.18
		0.5	305.79	-2.29	-2.47	0.14	4.39	0.06	0.04	6.09
		0.9	386.13	-2.29	-2.47	0.10	0.36	0	0	3.73

При использовании коротковолнового излучения основной вклад в суммарную систематическую погрешность θ определения температуры поверхности объекта вносит неточность знания длины волны используемой оптико-электронной системы. Так, при $\lambda = 0.50$ мкм абсолютная погрешность знания длины волны $\Delta\lambda = 0.01$ мкм приводит к относительной погрешности определения температуры δT_λ , равной 0.03, 0.02 и 0.01% для $T = 1000, 700$ и 400 К, соответственно, для малоотражающих поверхностей и 0.80, 0.56 и 0.32% для указанных температур малоизлучающих поверхностей, соответственно. Причина этого факта обусловлена особенностью спектрального распределения излучаемой объектом энергии, то есть распределением Планка.

При использовании ОЭС, работающей в ближней и/или дальней инфракрасной области спектра (этот диапазон длин волн используется в большинстве тепловизионных систем), основной вклад в суммарную систематическую погрешность θ определения температуры поверхности объекта вносят неточности знания ε_λ и ε_0 . Так, для $\lambda = 14.0$ мкм 5%-ная погрешность в знании ε_λ приводит к $\delta T_{\varepsilon_\lambda} = -2.9$ и -1.4% при $T = 1000$ и 400 К, соответственно. Для $\lambda = 14.0$ мкм абсолютная погрешность $\Delta\varepsilon_0 = -0.05$ приводит к $\delta T_{\varepsilon_0} = -3.1$ и -1.5% для $T = 1000$ и 400 К, соответственно.

Вполне ожидаема роль неточности знания излучательной способности фона $\Delta\varepsilon_\phi$ и его температуры ΔT_ϕ . Видно, что при использовании коротковолнового участка спектра излучения ($\lambda = 0.50$ мкм и $\lambda = 2.0$ мкм) погрешности знания излучательной способности фона и его температуры практически не влияют на суммарную систематическую погрешность θ определения температуры поверхности объекта. Однако при использовании длинноволнового участка спектра излучения метрологическая ситуация кардинально изменяется. Например, при $\lambda = 50.0$ мкм и $T = 400$ К абсолютная погрешность $\Delta\varepsilon_\phi = 0.1$ приводит к относительной погрешности $\delta T_{\varepsilon_\phi} = 41, 4.4$ и 0.4% для $\varepsilon = 0.1, 0.5$ и 0.9 , соответственно. Погрешность знания температуры фона для рассматриваемых условий вносит лишь незначительный вклад в численное значение θ .

Таким образом, параметры поверхности исследуемого объекта пирометрии, окружающего его фона и используемой оптико-электронной системы по-разному влияют на метрологические параметры результатов измерений [28]. Предложенный подход позволяет определить реальную погрешность измерения температуры поверхности объекта, а, следовательно, приблизить метрологические параметры ОЭС, указываемые их производителями, и метрологические параметры результатов измерения, получаемые пользователями ОЭС.

Выводы

Предложена математическая модель метода определения температуры поверхности объекта – основного информационного параметра технологических процессов производства объектов и их теплового состояния на всех этапах жизненного цикла. Для монохроматических оптико-электронных систем методом малых возмущений выполнен метрологический анализ предложенного способа определения температуры поверхности объекта. Комплексный анализ пирометрии, подобный рассмотренному, должен предшествовать не только процессу измерения температуры поверхности объекта, но и процедуре выбора оптико-электронной системы для его реализации.

Литература:

1. Битюков В.К. Диагностирование радиоэлектронной аппаратуры по собственному инфракрасному излучению // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1991. № 2. С. 227–235.
2. Битюков В.К. Об одном способе учета излучения фона при бесконтактном тепловом контроле // Изв. ВУЗов. Приборостроение. 1991. Т. 34. № 1. С. 90–96.
3. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия. М.: Физматлит, 2012. 248 с.
4. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 4. С. 5–28.
5. Битюков В.К., Петров В.А. Бесконтактное измерение температуры диэлектриков и полупроводников. Ч. I // Микроэлектроника. 2004. Т. 33. № 6. С. 403–418.
6. Битюков В.К., Петров В.А. Бесконтактное измерение температуры диэлектриков и полупроводников. Ч. II // Микроэлектроника. 2005. Т. 34. № 1. С. 3–20.
7. <http://temperatures.ru> (дата обращения 15.07.2016 г.).
8. Фрунзе А.В., Фрунзе А.А. Новые пирометры ТЕРМОКОНТ для измерения температуры металлов на основе фотодиодных приемников // Датчики и системы. 2014. № 3. С. 59–61.
9. Захаренко В.А., Кликушин Ю.Н., Пономарев Д.Б. Пирометры компенсационного типа // Метрология. 2014. № 4. С. 25–31.
10. Ходунков В.П., Походун А.И. Определение действительной температуры объекта при тепловизионных измерениях // Измерительная техника. 2013. № 11. С. 42–46.
11. Мирошников М.М. Тепловидение – высшее достижение оптико-электронного приборостроения // Тепловидение: Межвузовский сборник научных трудов. М.: МИРЭА, 1992. С. 4–6.
12. Девятков Н.Д., Жуков А.Г. Разработки тепловизионной аппаратуры ГНПП «Исток» // Тепловидение: Межвузовский сборник научных трудов. М.: МИРЭА, 1992. С. 47–52.
13. Евтихийев Н.Н., Куртев Н.Д., Голубь Б.И., Смирнов А.В. Широкоспектральный тепловизор АТП-47С // Тепловидение: Межвузовский сборник научных трудов. М.: МИРЭА, 1994. С. 49–52.
14. Фрунзе А.А. О чем полезно знать при выборе пирометра // Фотоника. 2013. Т. 37. № 1. С. 110–118.
15. Ионов А.Б. Метрологические проблемы пирометрии: анализ и перспективы преодоления // Измерительная техника. 2013. № 6. С. 42–45.
16. Геращенко О.А., Гордов А.Н., Еремина А.К. [и др.]. Температурные измерения: справочник / Отв. ред. О.А. Геращенко. Киев: Наукова думка, 1989. 704 с.
17. Битюков В.К., Петров В.А. Установка для измерения коэффициента теплопроводности твердых частично прозрачных для теплового излучения материалов // Промышленная теплотехника. 1982. Т. 4. № 1. С. 72–77.
18. Битюков В.К., Петров В.А. Методы и средства бесконтактного контроля теплового состояния изделий. М.: МИРЭА, 1999. 96 с.
19. Битюков В.К., Петров В.А. Контроль теплового состояния изделий радиоэлектроники из полупрозрачных материалов. М.: МИРЭА, 2000. 187 с.
20. Фрунзе А.В. О дальнейших путях развития пирометрии // Приборы. 2012. № 7(145). С. 54–59.

21. Фрунзе А.А., Фрунзе А.В. О погрешностях измерений температуры реальных объектов энергетическими пирометрами // Датчики и системы. 2014. № 3. С. 41–43.
22. Левин Е.В., Окунев А.Ю. Исследование точности измерения температуры на основе анализа энергетического баланса на приемнике излучения ИК-прибора // Измерительная техника. 2015. № 5. С. 48–52.
23. Левин Е.В., Окунев А.Ю. Влияние погрешностей задания рабочих параметров на точность измерения температуры инфракрасными приборами // Измерительная техника. 2016. № 1. С. 60–64.
24. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Прогнозы развития тепловизионной техники и твердотельной фотоэлектроники: как быстро они сбываются // Труды XXIII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М.: ОАО НПО «Орион», 2014. С. 27–29.
25. Фрунзе А.В. Об одной малоизвестной особенности пирометров спектрального отношения // Фотоника. 2013. Т. 39. № 3. С. 86–94.
26. Bityukov V.K., Petrov V.A., Stepanov S.V. Contactless Measurements of the Thermal Conductivity of Semitransparent Materials at High Temperatures // High Temperatures-High Pressures. 1980. V. 12. № 2. P. 229–236.
27. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. Л.: Энергия, 1978. 262 с.
28. Фрунзе А.В. Влияние методических погрешностей пирометра на выбор прибора // Фотоника. 2012. Т. 33. № 3. С. 46–51.

УДК 621.396.67

АНТЕННА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ С УМЕНЬШЕННЫМ УРОВНЕМ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ ЗА СЧЕТ ПЕРЕМЕННОЙ ФАЗОВОЙ СКОРОСТИ

В.М. Гончаренко, к. т. н., доцент

К.С. Чемесов[@], студент

Е.Б. Третьяков, студент,

С.В. Марьин, заведующий лабораторией

*Кафедра теоретической радиотехники и радиофизики,
Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия*

@Автор для переписки, e-mail: Konstantin-chemesov@yandex.ru

Одним из ведущих параметров, характеризующих качество антенн, является уровень бокового излучения, который в ряде случаев должен быть минимально возможным при минимальных габаритах антенны. Целью настоящей работы является нахождение способа уменьшения уровня бокового излучения при неизменных массово-габаритных параметрах антенны. В результате исследования выявлена связь между функцией распределения замедления фазовой скорости вдоль антенны бегущей волны и уровнем бокового излучения. Установлено, что при некоторых законах изменения фазовой скорости вдоль антенны уровень бокового излучения может заметно уменьшаться. На основании численного анализа диаграммы направленностей антенны бегущей волны с замедленной фазовой скоростью, изменяющейся по синусоидальному закону, выявлено уменьшение уровня первого и второго боковых лепестков в 1.5...3 раза по сравнению с обычной оптимальной антенной бегущей волны. Несмотря на уменьшение бокового излучения, коэффициент направленного действия оказывается таким же, как и у обычной антенны бегущей волны с постоянной фазовой скоростью той же длины.

Ключевые слова: антенны, диаграмма направленности, коэффициент направленного действия, уровень бокового излучения, синусоидальный закон.

TRAVELING-WAVE ANTENNA WITH A REDUCED LEVEL OF SIDE LOBES DUE TO VARIABLE PHASE VELOCITY

V.M. Goncharenko,

K.S. Chemesov[@],

E.B. Tretyakov,

S.V. Maryin

Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia

@Corresponding author e-mail: Konstantin-chemesov@yandex.ru

One of the main parameters that characterize the quality of the antenna side lobe level is that in some cases should be the lowest possible with minimum dimensions of the antenna. The aim of this work is to find a method for reducing the side lobe level at constant mass-dimensional parameters of the antenna. The study has found a link between the distribution function of the deceleration phase velocity along the traveling wave antenna and the level of the side lobe. In particular, it was found that under certain laws of the phase velocity changes along the antenna, the level of the side lobe can be reduced significantly. As a result of numerical analysis of directional antennas traveling wave chart with slow phase velocity varying sinusoidally, revealed a decrease in the level of the first and second side lobes 1.5 ... 3 times as compared with the conventional optimum traveling wave antenna. Despite the reduction in the emission side, directional factor is the same as that of a conventional antenna of a traveling wave with a constant phase velocity of the same length.

Keywords: antennas, radiation pattern, directional ratio, the level of the side lobe, sinusoidal law.

Введение

Одним из ведущих параметров, характеризующих качество антенн, является уровень бокового излучения, который в ряде случаев должен быть минимально возможным при минимальных габаритах антенны. Целью настоящей работы является нахождение способа уменьшения уровня бокового излучения при неизменных массово-габаритных параметрах антенны.

В настоящей работе представлены результаты расчетов диаграммы направленности (ДН), коэффициента направленного действия (КНД) и уровня боковых лепестков линейной антенны бегущей волны с переменной замедленной фазовой скоростью $\xi_i(z)$:

$$\xi_i(z) = \frac{c}{V_{\phi}^i(z)},$$

где c – скорость света, V_{ϕ}^i – фазовая скорость излучающего тока на излучателе, $V_{\phi}^i < c$.

Полагается, что излучающие элементы антенны изотропны. Так как в реальных антеннах основной лепесток множителя решетки намного более узкий по сравнению с основным лепестком элемента, то ДН антенны в этой области мало зависит от ДН элемента, и в целом ДН отдельного элемента оказывает малое влияние на ДН и КНД антенны. В расчетах не учитывается, что при изменении замедления $\xi_i(z)$ будет изменяться и амплитуда излучающего тока. В нашем случае это соответствует $p = n < 3 \dots 4$ и $m = 2$.

Замедление $\xi_i(z)$ задается выражением

$$\xi_i(z) = (\xi_i^{opt} \pm p\Delta_i^n) \pm n\Delta_i^n \sin\left(\frac{m\pi z}{L_i}\right),$$

где $\xi_i(z) = 1 + \frac{\lambda_0}{2L_i}$ – замедление на оптимальной антенне; m – любое число, которое задает соотношение длины антенны L_i и длины волны излучающего тока; n и p – целые числа, изменяющиеся от 1 до 10.

В случае $n = p = 0$ рассчитывается оптимальная антенна с $\xi_i^{opt} \Delta_i = k_0(\xi_i^{opt} - 1)$ – интервал постоянного распространения оптимальной антенны длиной L_i и постоянной скоростью распространения в вакууме; k_0 – максимальный интервал замедления, $\Delta_i = \frac{\Delta_i}{N}$ – подинтервал, N – число разбиений максимального интервала, принятое равным 10.

Постоянная распространения излучающего тока $\Gamma_i(z)$ и замедление $\xi_i(z)$ связаны формулой

$$\Gamma_i(z) = k_0 \cdot \xi_i(z) \quad (1)$$

Расчетные формулы

Постоянная распространения излучающего тока $\Gamma_i(z)$ в соответствии с (1) записывается в виде:

$$\Gamma_i^{(2)}(z) = (\Gamma_{opt}^i - p\Delta_i^n) + n\Delta_i^n \sin\left(\frac{mnz}{L_i}\right) \quad (2)$$

$$\Gamma_i^{(3)}(z) = (\Gamma_{opt}^i - p\Delta_i^n) - n\Delta_i^n \sin\left(\frac{mnz}{L_i}\right) \quad (3)$$

$$\Gamma_i^{(4)}(z) = (\Gamma_{opt}^i + p\Delta_i^n) + n\Delta_i^n \sin\left(\frac{mnz}{L_i}\right) \quad (4)$$

$$\Gamma_i^{(5)}(z) = (\Gamma_{opt}^i + p\Delta_i^n) - n\Delta_i^n \sin\left(\frac{mnz}{L_i}\right), \quad (5)$$

где $\Gamma_{opt}^i = k_0(1 + \frac{\lambda_0}{2L_i})$ – постоянная распространения излучающего тока на оптимальной антенне, $(\Gamma_{opt}^i + p\Delta_i^n)$ – среднее значение замедления, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ – постоянная распространения в вакууме, $\frac{2\pi}{\lambda_0}$ – длина волны в вакууме, принятая равной 3 см, $L_i = i \cdot \lambda_0$ – длина

антенны в длинах волны, i – любое действительное число.

Расчет ДН и КНД соответственно выполняется по формулам [1, 2]

$$F(\theta) = \int_{z=0}^{L_i} A(z) e^{jk_0 z \cos \theta - j\Gamma_i(z)z} dz, \quad (6)$$

где $A(z)$ – амплитуда тока, принятая равной единице;

$$D_i = \frac{2}{\int_{\theta=0}^{\pi} f_i^2(\theta) \sin \theta d\theta}, \quad (7)$$

где $f_i(\theta)$ – нормированная к своему максимуму ДН.

Расчеты проведены по разработанной программе, а также построены графики соответствующих функций ДН, КНД, уровня боковых лепестков.

Результаты и их обсуждение

Расчеты по формулам (2)–(5) были проведены для вариации постоянной распространения $\Gamma_i(z)$. Длина антенны изменялась в пределах от 0.5 до 10 длин волн, $n = 0 \dots 10$, $m = 0.5 \dots 10$, $p = 0 \dots 5$. Уменьшение бокового излучения наблюдается только при $m = 2$, поэтому далее в статье рассматривается только этот случай.

На рис. 1 приведены ДН антенны в случае расчета постоянной распространения по формуле (2) при $p = 0$, $i = 3$ при различных n .

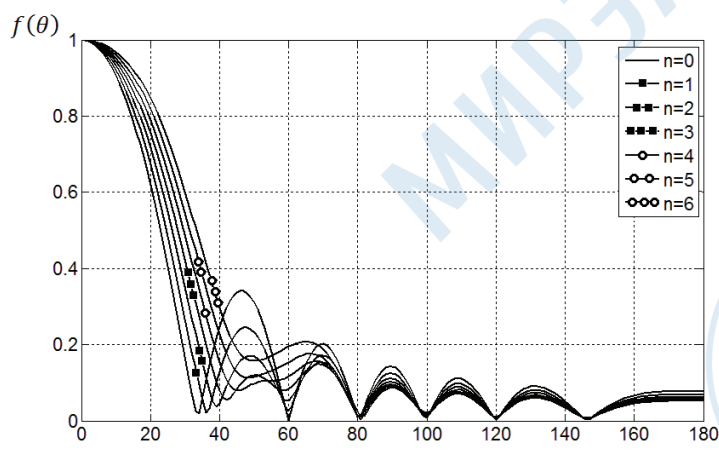


Рис. 1. Диаграммы направленностей антенны в случае (2) при $p = 0$, $i = 3$, $m = 2$ при различных n .

На рис. 2 приведена зависимость относительного уровня первого бокового лепестка ($УБЛ1(2)'$) от переменной n , в случае расчета постоянной распространения по формуле (2), при $p = 0$, $i = 3$

$$УБЛ1(2)' = \frac{УБЛ1(2)}{УБЛ_{opt}},$$

где $УБЛ1(2)'$ – уровень первого бокового лепестка рассчитываемой антенны, $УБЛ_{opt}$ – уровень первого бокового лепестка оптимальной антенны ($УБЛ_{opt} = 0.34$).

На рис. 3 приведена зависимость относительного КНД $D'(2)$ от переменной n , выражаемого формулой

$$D'(2) = \frac{D_i(2)}{D_{opt}},$$

где $D'(2)$ – КНД рассчитываемой антенны при постоянной распространения, рассчитываемой по закону (2), D_{opt} – КНД оптимальной антенны (длина оптимальной антенны равна длине анализируемой, и $n = p = 0$).

Диаграммы направленностей для случаев (2) и (4) при различных значениях i и p при вариации n показаны на рис. 4–7.

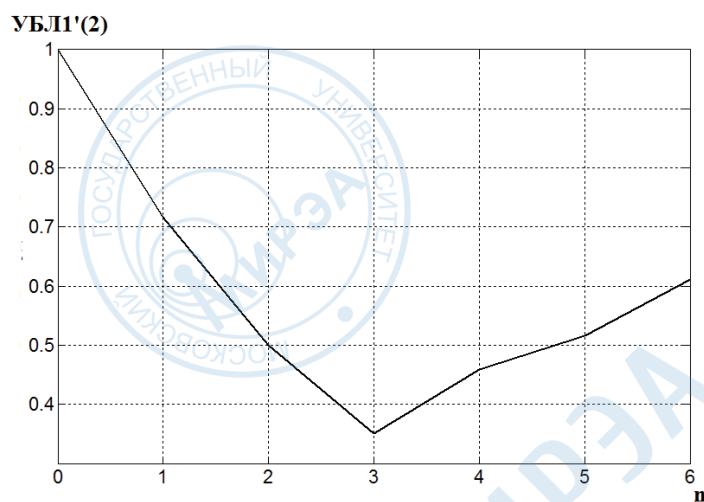


Рис. 2. Зависимость относительного уровня первого бокового лепестка от переменной n в случае (2).

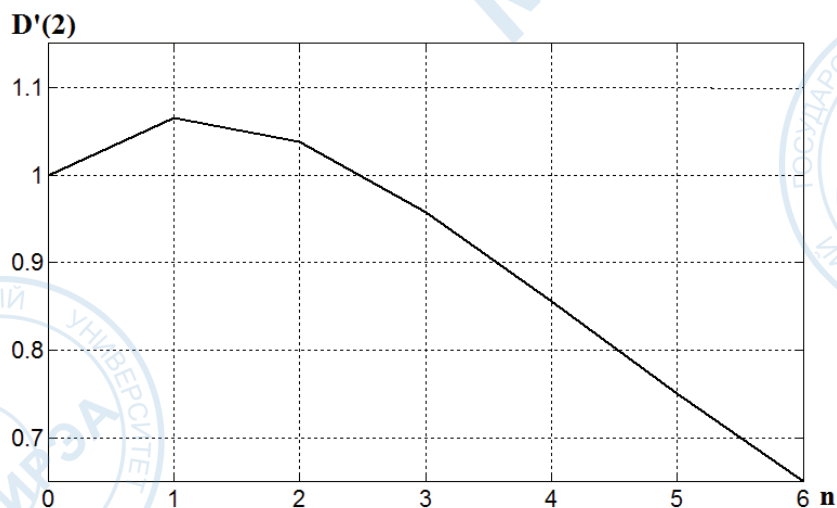


Рис. 3. Зависимость относительного КНД от переменной n .

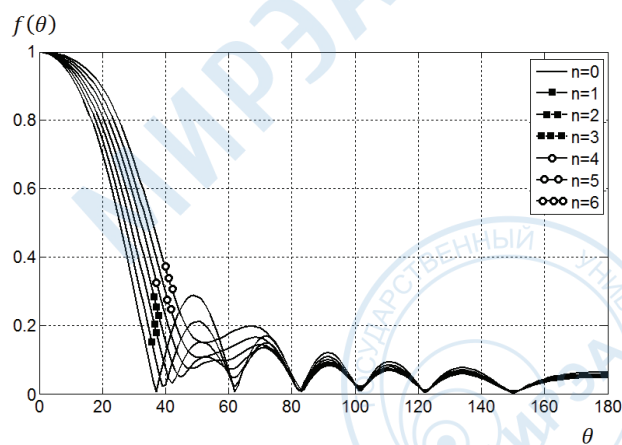


Рис. 4. Диаграммы направленностей антенны в случае (2) при $p = 2$, $i = 3$, $m = 2$ при различных n .

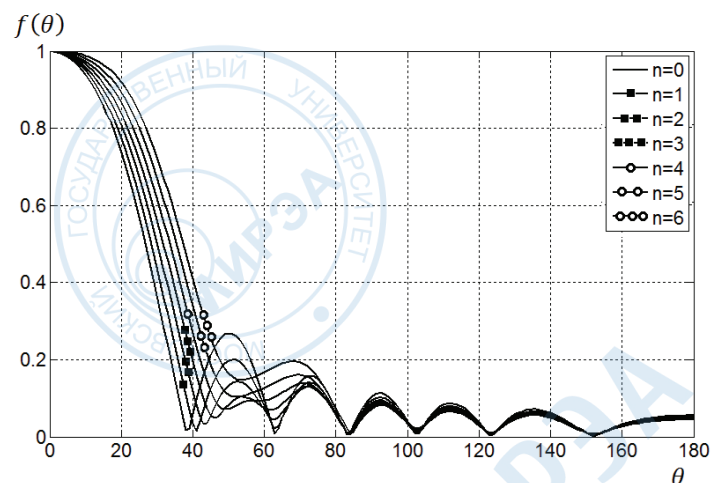


Рис. 5. Диаграммы направленностей антенны в случае (2) при $p = 3$, $i = 3$, $m = 2$ при различных n .

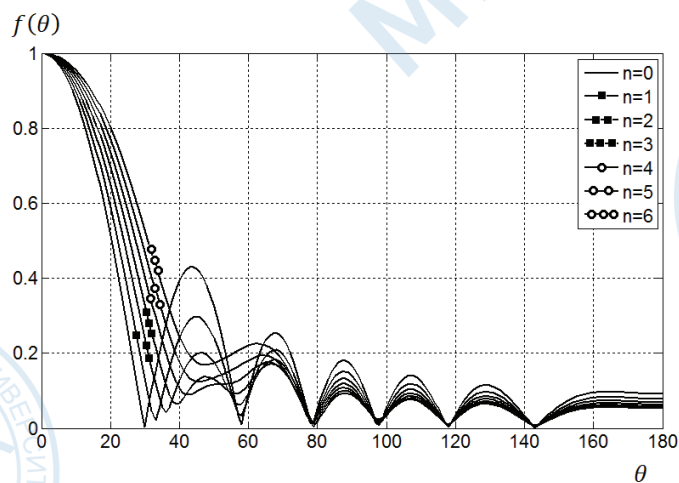


Рис. 6. Диаграммы направленностей антенны в случае (4) при $p = 2$, $i = 3$, $m = 2$ при различных n .

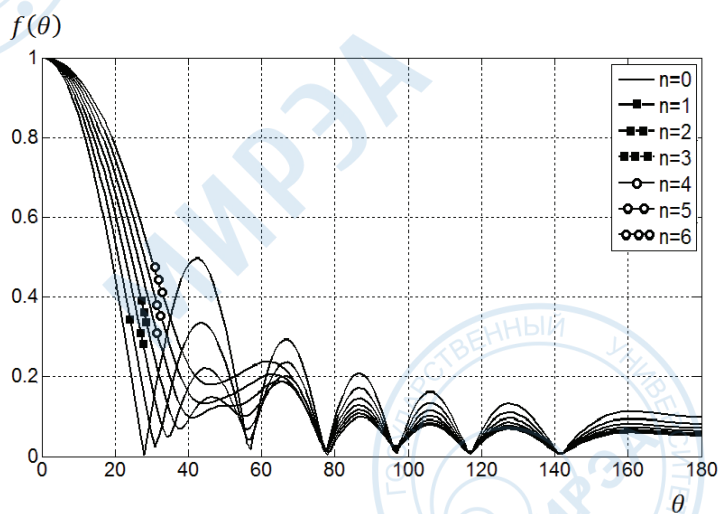


Рис. 7. Диаграммы направленностей антенны в случае (4) при $p = 3$, $i = 3$, $m = 2$ при различных n .

Графики зависимостей $УБЛ1(2)(z)$ от n при $p = 1, 2, 3$ для случаев (2) и (4) показаны соответственно на рис. 8 и 10, а графики зависимостей относительного значения $D'(2)$ — на рис. 9 и 11.

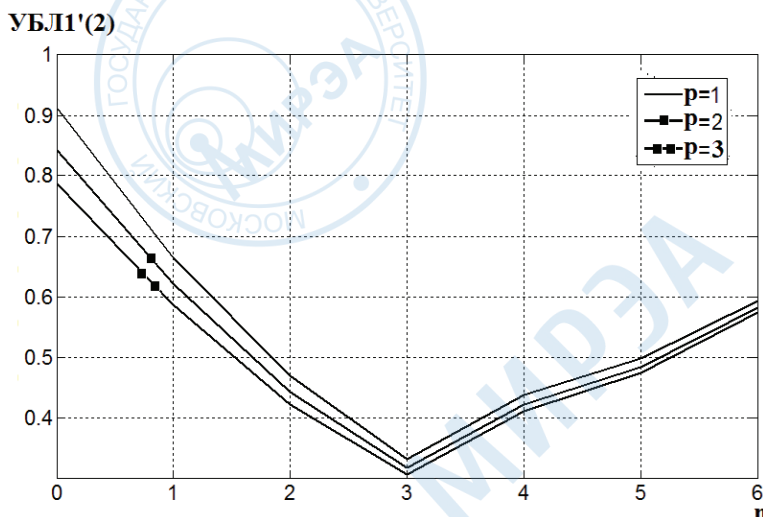


Рис. 8. Графики зависимостей $УБЛ1(2)(z)$ от n для случая (2) при $p = 1, 2, 3$.

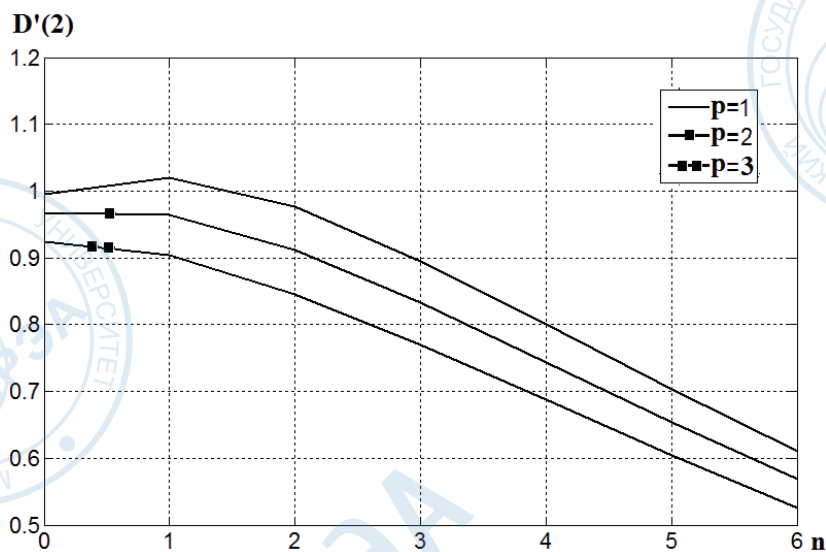


Рис. 9. Графики зависимостей относительного значения $D'(2)$ от n для случая (2) при $p = 1, 2, 3$.

Из приведенных графиков видно, что в рассматриваемых случаях ширина основного лепестка рассчитываемой антенны увеличивается по сравнению с шириной лепестка оптимальной антенны. Направления с нулевым излучением отсутствуют. Только в случае $m = 2, n \leq 4$ и $p \leq 4$ уровень первого и второго лепестков уменьшается в 1.5...3.0 раза при задании $\Gamma_i(z)$ по формулам (2) или (4). В других случаях боковые лепестки всегда растут.

Сравнение результатов расчетов для случаев изменения $\Gamma_i(z)$ по законам (2) и (4) приводит к следующим выводам:

в случае закона (2), при $p = 0$, $УБЛ1$ уменьшается приблизительно в 3 раза, а КНД возрастает приблизительно на 6% при изменении n ;

в случае закона (4), при $p = 1$, $УБЛ1$ уменьшается приблизительно в 3 раза, а КНД возрастает приблизительно на 12% при изменении n ;

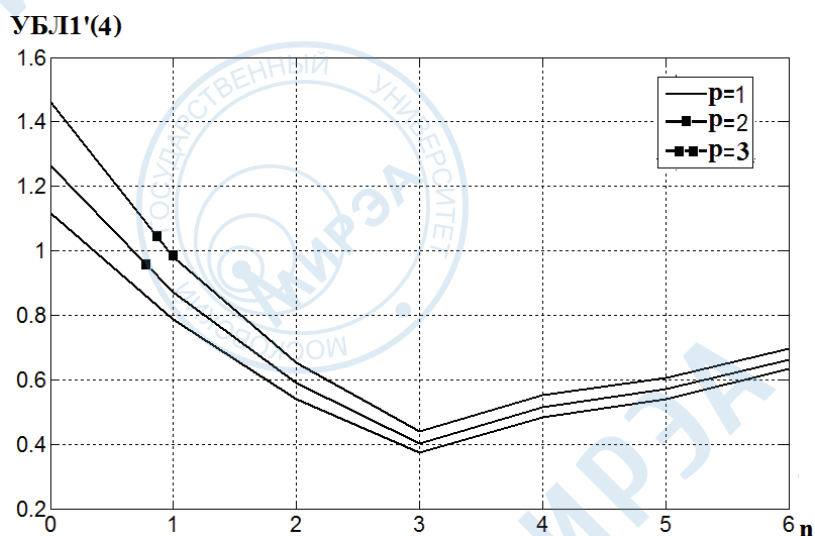


Рис. 10. Графики зависимостей $УБЛ(4)'(z)$ от n для случая (4) при $p = 1, 2, 3$.

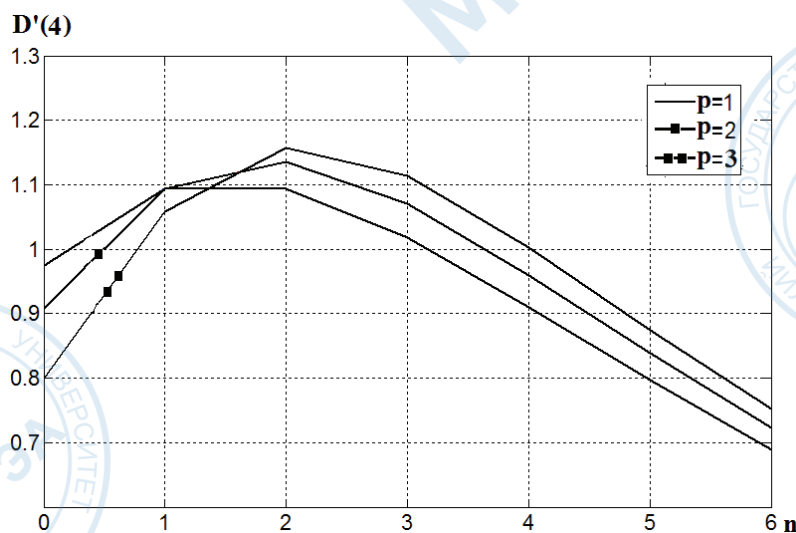


Рис. 11. Графики зависимостей относительного значения $D'(2)$ от n для случая (2) при $p = 1, 2, 3$.

в случае закона (4), при $p = 3$, УБЛ1 уменьшается приблизительно в 3.5 раза, а КНД возрастает приблизительно на 15% при изменении n .

Полученные результаты качественно совпадают с общей теорией антенн бегущей волны с постоянной замедленной фазовой скоростью.

В случае, если $\Gamma_i(z)$ изменяется по формуле (2), то среднее значение замедления убывает, что приводит к расширению основного лепестка диаграммы направленности и уменьшению уровня первого бокового лепестка, по сравнению с оптимальной антенной. Здесь согласованно действуют два фактора: замедление $\zeta_i(z)$ изменяется по синусоидальному закону и убывает по отношению к случаю оптимальной антенны, при $m = 2$ и малых значениях переменных n и p .

Следует отметить, что в случае, когда замедление растет в начале антенны (у точки питания, как в случаях (2) и (4)), уровень бокового излучения рассчитываемой антенны становится меньше, чем у оптимальной. КНД в этом случае не меньше, чем у оптимальной, что коррелирует с синтезированными антеннами, описанными в [5], однако их электрические параметры оказываются существенно выше, чем в нашем случае.

Выводы

В случае изменения $\Gamma_i(z)$ по законам (2) и (4) более предпочтительным является закон (4).

В этом случае КНД рассчитываемой антенны в области $n \leq 4$ возрастает на 15% по отношению к КНД оптимальной антенны, а уровень первого бокового лепестка уменьшается в 1.5–2.5 раза.

Таким образом, возникает возможность создания антенны, у которой габаритные размеры будут такими же, как у оптимальной антенны, уровень первого бокового лепестка станет меньше, чем у оптимальной, в 1.5-2.5 раза, а КНД будет больше на 15%.

В случае (2) уровень первого бокового лепестка будет в 3 раза меньше, но КНД также уменьшится примерно на 15% при $n \leq 2$, $p \leq 3$.

Полученные результаты при одинаковых законах постоянной распространения $\Gamma_i(z)$ не зависят от переменной i при равных p и n .

Литература:

1. Фрадин А.З. Антенны сверхвысоких частот. М.: Связь, 1977. 440 с.
2. Никольский В.В. Антенны. М.: Связь, 1966. 368 с.
3. Воскресенский Д.И. Антенны и устройства СВЧ. М.: Советское Радио, 1972. 315 с.
4. Кюн Р. Микроволновые антенны. М.: Судостроение, 1967. 518 с.
5. Айзенберг Г.З. Антенны УКВ. Т.1. М.: Связь. 1977. 699 с.
6. Терешин О.Н., Седов В. М., Чаплин А. Ф. Синтез антенн на замедляющих структурах. М.: Связь, 1980. 136 с.
7. Нефедов Е.И. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства. М.: Академия, 2010. 320 с.
8. Гончаренко В.М., Чемесов К.С., Третьяков Е.Б. Антенна бегущей волны с переменной замедленной фазовой скоростью, с уменьшенным уровнем бокового излучения / Сб. научных трудов Школы молодых ученых «Перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» РАДИОИНФОКОМ-2015, Москва, 14–18 апреля 2015 г., МИРЭА. С. 5–10.

УДК: 621.375.4

МОНОЛИТНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА МАЛОШУМЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ НА НИТРИДЕ ГАЛЛИЯ ДЛЯ ДИАПАЗОНА 57–64 ГГц

Д.В. Крапухин^{1,2,@}, аспирант, инженер-исследователь
П.П. Мальцев^{1,2}, д.т.н., профессор

¹Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия

²Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники
Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), Москва, 117105 Россия

@Автор для переписки, e-mail: d.krapukhin@gmail.com

Статья посвящена разработке малошумящего усилителя для диапазона 57–64 ГГц на гетероструктуре нитрида галлия. В ней рассмотрены уже существующие коммерческие разработки в области малошумящих усилителей диапазона 60 ГГц, определены средние характеристики усилителей данного диапазона. Выполнены измерения тестовых HEMT-транзисторов на нитриде галлия, на основании которых созданы модели транзисторов – модель Fujii и модель Поспешальского. Спроектирована принципиальная схема усилителя, состоящая из 4-х каскадов, и выполнен полный электродинамический расчет топологии в САПР ADS. Измерения изготовленного образца продемонстрировали работоспособность в требуемом диапазоне частот (коэффициент усиления более 16 дБ, коэффициент шума менее 6.5 дБ), хорошее соответствие результатов расчетов и измерений. Описан технологический этап формирования сквозных отверстий, обеспечивающих общую заземляющую плоскость элементов схемы.

Ключевые слова: монолитная интегральная схема, миллиметровый диапазон, малошумящий усилитель, HEMT-транзистор, коэффициент шума, наногетероструктура AlGaIn/GaN.

MONOLITHIC INTEGRATED CIRCUIT OF GaN LOW-NOISE AMPLIFIER FOR 57–64 GHz BANDWIDTH

D.V. Krapukhin^{1,2,@}, P.P. Maltsev^{1,2}

¹Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia

²Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy
of Sciences (IUHFSE RAS), Moscow, 117105 Russia

@Corresponding author e-mail: d.krapukhin@gmail.com

The article describes the development of a low-noise amplifier for the 57-64 GHz band based on a wide-gap semiconductor – gallium nitride. We analyze existing commercial

developments in the area of low-noise amplifiers for the 60 GHz band, which are based mainly on gallium arsenide. At the initial stage we developed test HEMT-transistors on the basis of which we created the transistor models – Fujii model and Pospieszalski model. On the basis of the developed models we designed an amplifier schematic circuit consisting of 4 cascades. Based on the schematic circuit, we designed a topology of a monolithic integrated circuit in the ADS CAD, and made a complete electrodynamic calculation of the topology, which showed reachability of the required characteristics in the frequency range 57-64 GHz. Conducted measurements of a manufactured sample showed the fulfillment requirements of the range and a good agreement with the calculations. One of the features of the technology of the developed amplifier is the step of forming of electrical connections - through holes, which provide a common grounding plane of the circuit.

Keywords: monolithic integrated circuit, millimeter wave, low-noise amplifier, HEMT, noise figure, AlGaIn/GaN heterostructure.

Введение

Диапазон 60 ГГц является типичным окном непрозрачности, то есть обладает сильным затуханием радиоволн в атмосфере – до 16 дБ/км, в то время как на частоте 38 ГГц затухание не превышает 0.3 дБ/км. Сильное затухание обусловлено поглощением радиоволн парами воды и молекулами кислорода, оно является и ключевым достоинством, и существенным недостатком. С одной стороны, сильное затухание делает диапазон не оптимальным для передачи сигнала на дальние расстояния (в единицы километров и более), с другой – позволяет создавать не взаимодействующие друг с другом сети и скрытные каналы связи. Во многих странах мира этот диапазон признан безлицензионным и, согласно принятым стандартам (в частности, IEEE 802.11ad и ISO/IEC 13156), на основе приборов, работающих на частоте 60 ГГц, будут создаваться локальные беспроводные сети, приемо-передающие устройства широкополосной внутрикомнатной связи, обеспечивающие высокоскоростную и скрытную передачу данных между электронными приборами. Устройства, работающие на частоте 60 ГГц, широко востребованы и в военной технике, в том числе, в перспективных образцах высокоточных систем вооружений, системах межспутниковой связи, радаров, антитеррористических системах и др.

Для создания приемного тракта приборов необходимы усилители с низким уровнем собственных шумов. Такие усилители называются малозумящими (МЗУ) и предназначены для работы со слабыми входными сигналами. Они имеют жесткие требования по максимальному коэффициенту шума.

1. Малозумящие усилители для диапазона 60 ГГц

Анализ доступных источников показал наличие на сайтах ряда производителей малозумящих усилителей диапазона 60 ГГц или близкого к нему. Разработка схем данного диапазона является сложной задачей как с точки зрения технологии (в частности, использование качественных гетероструктур), так и с точки зрения проектирования. Обнаружено лишь 13 образцов, которые созданы крупнейшими производителями СВЧ-электроники: *TriQuint*, *United Monolithic Semiconductors*, *Microsemi*, *Hittite*, *Norden Millimeter*, *Sumitomo*, *RFlambda* и *Ducommun*. Характеристики найденных образцов сведены в таблицу. У большинства усилителей в качестве материала гетероструктуры указан арсенид

галлия. По достигнутым характеристикам остальных усилителей можно предположить, что они тоже изготовлены на арсениде галлия.

Основными величинами рассмотренных усилителей являются коэффициент передачи (S_{21}) и коэффициент шума (NF). Характеристикой согласования считаются коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) и уровень обратных потерь, которые связаны между собой формулой:

$$КСВН = \frac{1 + 10^{-\frac{RL}{20}}}{1 - 10^{-\frac{RL}{20}}} \quad (1)$$

где RL (Return Loss) – входные или выходные обратные потери. При хорошем согласовании значение КСВН менее 2, что соответствует уровню обратных потерь менее -10дБ.

Сводная таблица характеристик МШУ диапазона 60 ГГц

Производитель	Серийный номер	Технология	Рабочая частота, ГГц	S_{21} , дБ	IRL, дБ	ORL, дБ	NF, дБ	Ток, мА	Напряжение, В
TriQuint [1]	TGA4600	GaAs pHEMT	57-65	13	-20	-6	4	41	3
Sumitomo Electric Industries [2]	FMM5716X	GaAs	57-64	22	-10	-15	4.5	30	3
United Monolithic Semiconductor [3]	CHA2159	GaAs pHEMT	55-65	20	-8	-10	4	115	3.5
United Monolithic Semiconductor [4]	CHA2157	GaAs pHEMT	55-60	8	-4	-8	4.5	80	3.3
Microsemi [5]	MMA036AA	Не указана	0-65	10.5	-28	-12	2.3*	85	4.5
Microsemi [5]	MMA035AA	Не указана	0-65	-	-	-	4.5*	150	7
Microsemi [5]	MMA034AA	Не указана	0-65	-	-	-	5.5*	250	8
Analog Devices (Hittite) [6]	HMC-ALH382	GaAs	57-65	23	-12	-11	4.6	64	2.5
RF-LAMBDA [7]	R50G69GSA	Не указана	50-69	10.5	-14	-16	3.8	220	5
RF-LAMBDA [8]	R50G69GSB	Не указана	50-69	23	-11	-14	5-6	152	5
RF-LAMBDA [9]	R50G69GSC	Не указана	50-69	39	-7	-6	4	227	5
Ducommun [10]	ALN-61086015	GaAs pHEMT	57-65	15	-10	-10	6	100	12
Ducommun [10]	ALN-61086030	GaAs pHEMT	57-65	30	-10	-10	6	150	12

* приведено значение коэффициента шума на 20 ГГц.

S_{21} – малосигнальный коэффициент усиления;

IRL (Input Return Loss) – входные обратные потери;

ORL (Output Return Loss) – выходные обратные потери;

NF (Noise Figure) – коэффициент шума (КШ).

Внешний вид топологии показан только для трех образцов: TriQuint TGA4600, Sumitomo Electric Industries (SEI) FMM5716X и UMS CHA2159 (рис. 1).

Трехкаскадный МШУ компании TriQuint (TGA4600) предназначен для диапазона частот 57–65 ГГц (рис. 1а). Усилитель построен по 0.15 мкм pHEMT-технологии с использованием микрополосок и трехслойной металлизации, габариты монолитной интегральной схемы (МИС) 1.62×0.84 мм [1]. Коэффициент усиления достигает значения 13–14 дБ,

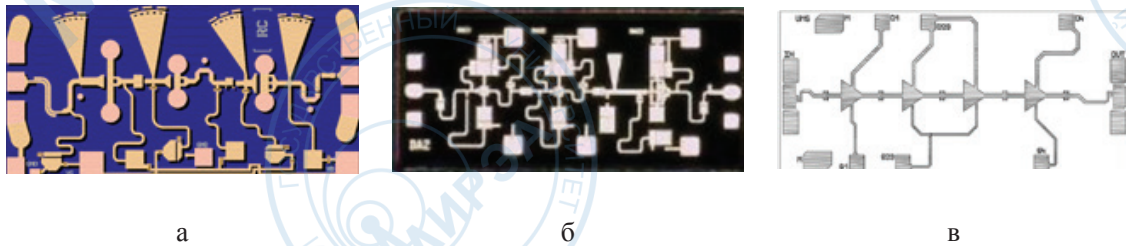


Рис. 1. Внешний вид МШУ: TriQuint TGA4600 (а), SEI FMM5716X (б) и UMS CHA2159 (в).

а коэффициент шума – около 4 дБ в рабочей полосе.

Малошумящий усилитель японской компании *Sumitomo Electric Industries* для диапазона 57–64 ГГц описан в работе [2], его внешний вид показан на рис. 1б. Усилитель имеет 3 каскада, построен по микрополосковой технологии на гетероструктуре арсенида галлия. Коэффициент усиления составил 20–22 дБ в рабочей полосе, коэффициент шума – 4.5–5 дБ. Габариты кристалла 1.54×0.7 мм.

На рис. 1в схематично показан четырехкаскадный усилитель французско-германской компании *United Monolithic Semiconductors* [3]. Усилитель построен по рНЕМТ-технологии с длиной затвора 0.15 мкм, имеет рабочий диапазон 55–65 ГГц и габариты МИС 2.35×1.11 мм. Усилитель относится к категории малошумящих, но одновременно позиционируется производителем и как усилитель мощности. Коэффициент усиления составляет около 20 дБ в рабочем диапазоне. Уровень шума, заявленный производителем – 4–4.8 дБ.

Таким образом, по результатам анализа усилителей, размещенных на сайтах производителей, можно сделать следующие выводы:

- в диапазоне 57–64 ГГц доступно крайне малое количество усилителей, что свидетельствует о сложности разработки схем данного диапазона, при этом российские аналоги отсутствуют;
- доминирующее положение в указанных усилителях занимает арсенид-галлиевая технология, которая обладает и ведущим положением на рынке СВЧ-электроники в целом;
- характеристиками мирового уровня можно считать коэффициент усиления около 10–20 дБ, уровень шума от 4 до 6 дБ, при хорошем согласовании входа и выхода; ток потребления 100–200 мА при напряжении питания 2.5–8 В; средние габариты МИС составили около 1.5×1.5 мм.

Отсутствие отечественных разработок и особенности диапазона 57–64 ГГц делают разработку МИС данного диапазона необходимым направлением развития российской СВЧ-электроники. Хотя МШУ изготавливаются, как правило, на GaAs-гетероструктурах, перспективным является создание приборов на широкозонных полупроводниках, в частности, на нитриде галлия. Использование широкозонного полупроводника позволит повысить выходную мощность и коэффициент усиления, что важно при создании целых приемо-передающих модулей на одном кристалле, а также снизить габариты и сделать усилитель более стойким к внешним воздействиям.

Целью настоящей работы явилась разработка МШУ на нитриде галлия для диапазона частот 57–64 ГГц, с коэффициентом передачи более 16 дБ, коэффициентом шума менее 6.5 дБ, при хорошем согласовании входа и выхода (КСВН входа и выхода менее 2) и работающего при напряжении питания 5–10 В (ток потребления не более 100 мА).

2. Проектирование МИС МШУ для диапазона 57–64 ГГц на нитриде галлия

На начальном этапе создания МИС нами изготовлены тестовые транзисторы (внешний вид показан на рис. 2) и проведены измерения S-параметров и вольт-амперных характеристик. По результатам измерений построены модели транзисторов: нелинейная модель Fujii (эквивалентная схема показана на рис. 3) и линейная модель Поспешальского (эквивалентная схема изображена на рис. 4).

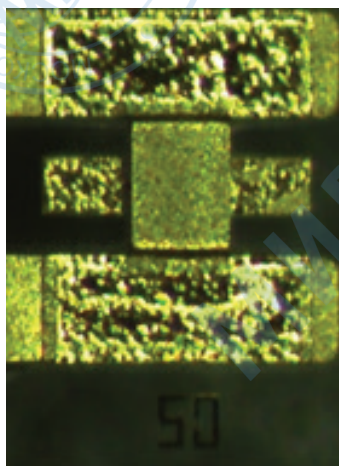


Рис. 2. Внешний вид тестового транзистора 2×50 мкм.

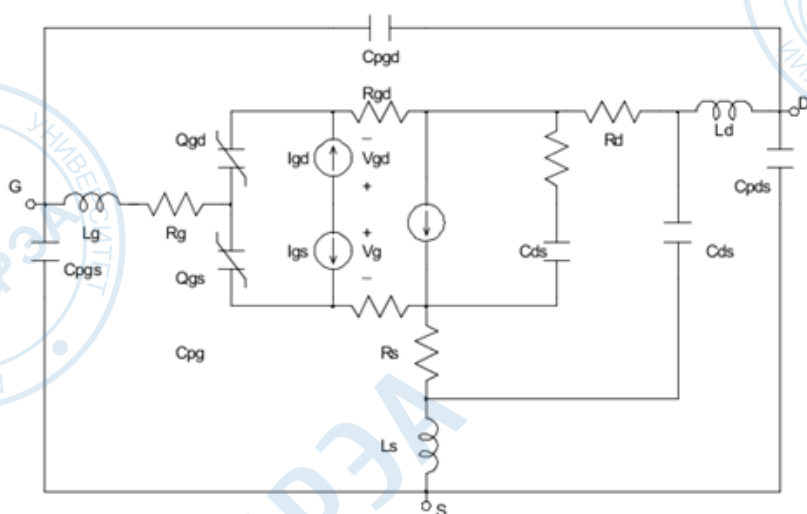


Рис. 3. Эквивалентная схема нелинейной модели транзистора Fujii.

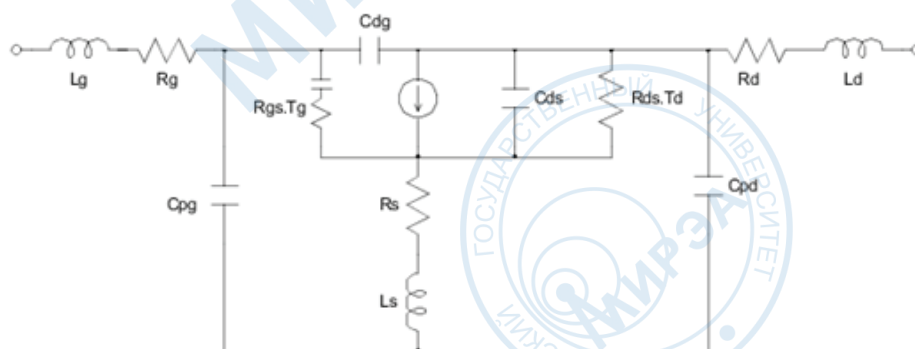


Рис. 4. Эквивалентная схема линейной модели транзистора Поспешальского.

Построенная нелинейная модель Fujii хорошо согласуется с результатами измерений: на рис. 5 показано сравнение результатов измерений вольт-амперных характеристик и значений, полученных по модели.

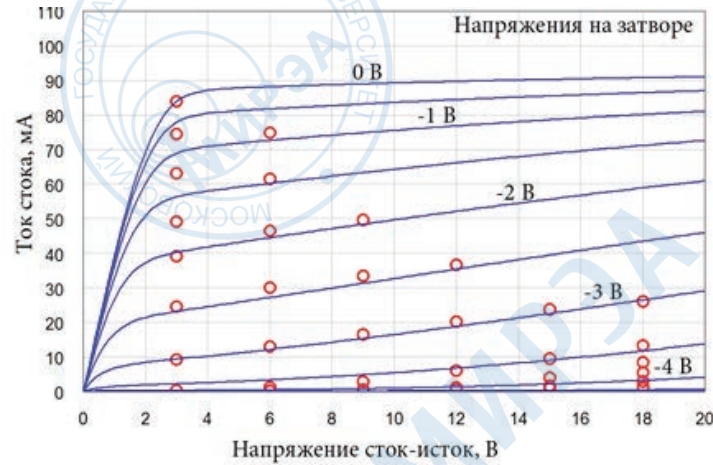


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика транзистора («○» – измеренные в рабочих точках значения, «-» – значения, рассчитанные по нелинейной модели).

Оценку коэффициента шума осуществляли по модели транзистора Поспешальского. Для оптимизации параметров этой модели используется одна рабочая точка, для которой также измерены значения коэффициента шума (рис. 6, серая линия).

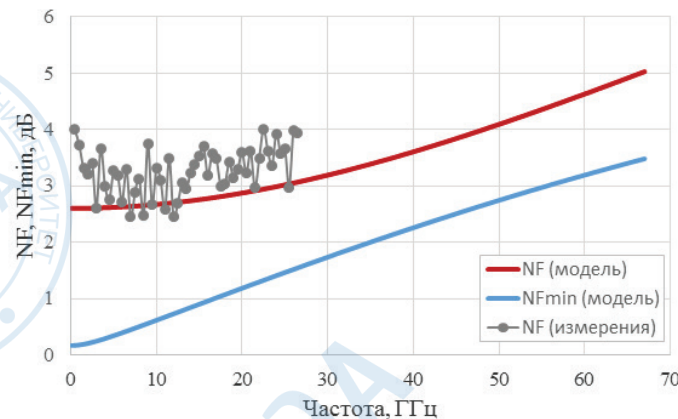


Рис. 6. Зависимость значений коэффициента шума в 50-Омном включении (красная линия), минимального коэффициента шума (синяя линия) по модели транзистора Поспешальского, измеренного коэффициента шума (серая линия) от частоты.

Согласно приведенным на рис. 6 результатам, расчетный коэффициент шума на частоте 60 ГГц составил около 4.5 дБ, что допускает возможность создания МШУ с расчетным коэффициентом шума менее 6.5 дБ.

Все расчеты проводили с использованием моделей НЕМТ-транзисторов, описанных выше, на гетероструктурах AlGaIn/GaN/сапфир с неутонченной подложкой толщиной 340 мкм и обратной металлизацией. Используемые транзисторы имеют величину коэффициента MaxGain около 6 дБ в диапазоне частот от 57 до 64 ГГц, таким образом, использование 4-х каскадов должно позволить достичь требуемых параметров (коэффициент передачи более 16 дБ).

Разрабатываемый усилитель имеет требования по коэффициенту шума, причем согласно формуле Фрииса, наибольший вклад в суммарный уровень шума оказывает первый каскад. Поэтому согласование импедансов первого каскада выполнено с учетом достижения минимального коэффициента шума. Формула Фрииса для расчета уровня шума имеет вид:

$$F_{sys} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} \quad (2)$$

где F_{sys} – уровень шума схемы;

F_i – шум i -го каскада;

G_i – коэффициент усиления i -го каскада.

На начальном этапе осуществляли схемотехническое моделирование усилителя в САПР Microwave Office на сосредоточенных элементах. Это наиболее простое моделирование, главным достоинством которого является быстрое получение результатов. Входная, выходная и межкаскадные согласующие цепи образованы конденсаторами и микрополосковыми линиями. Усилитель «собирается» из библиотечных элементов САПР, задается соответствующая подложка, и после этого осуществляется оптимизация значений элементов, расчет характеристик и построение необходимых зависимостей. Согласование входа выполнялось на достижение минимального уровня шума. Принципиальная схема разработанного МШУ показана на рис. 7 [11].

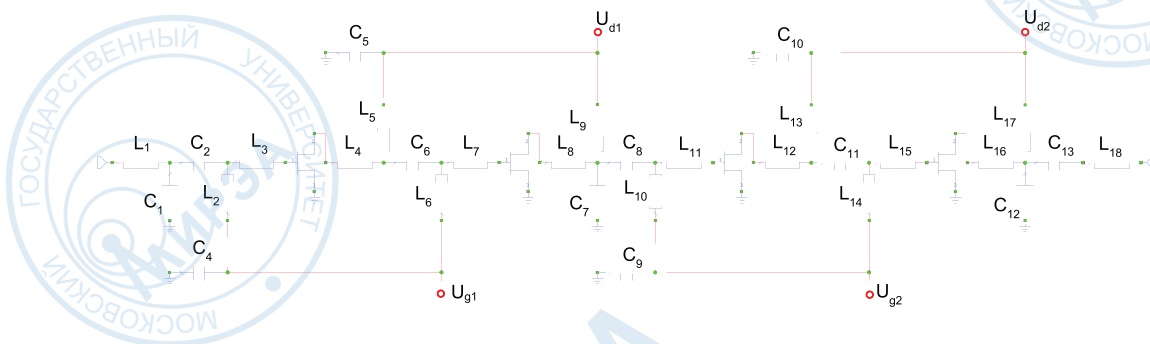


Рис. 7. Принципиальная схема четырехкаскадного усилителя.

Схемотехническое моделирование не является достаточно точным для того, чтобы по его результатам изготавливать МИС. Во-первых, сосредоточенные элементы не полностью отражают поведение реальных элементов в СВЧ-диапазоне, при этом, чем выше диапазон, тем сильнее несоответствие между реальным и библиотечным элементами. Во-вторых, с повышением частоты уменьшаются не только размеры элементов, но и расстояние между ними, то есть компоновка элементов становится более плотной, и необходимо учитывать их взаимное влияние друг на друга. С целью учета этих факторов мы проводили электродинамическое моделирование и необходимые корректировки элементов. Для электродинамического моделирования схема, полученная при моделировании на сосредоточенных элементах, создается в виде топологии (рис. 8) в САПР Advanced Design System (ADS): размеры МШУ составили 1.15×2.26 мм. МИС усилителя имеет 6 разварочных площадок: вход, смещение на затворы транзисторов (2 шт.), питание (2 шт.), выход.

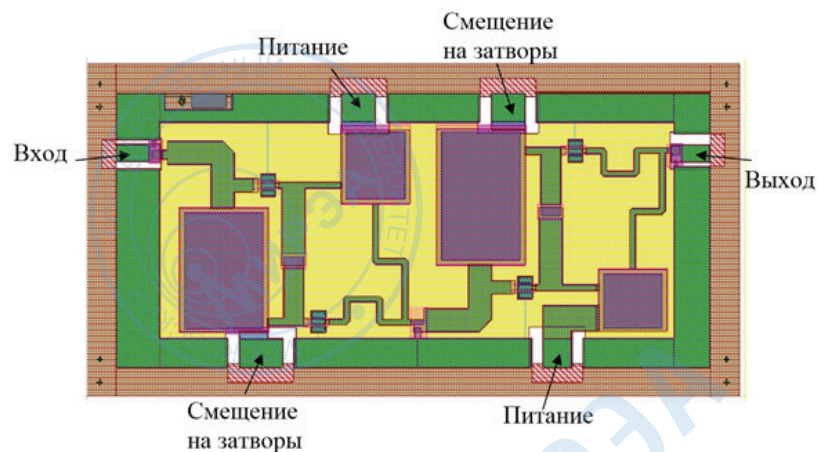
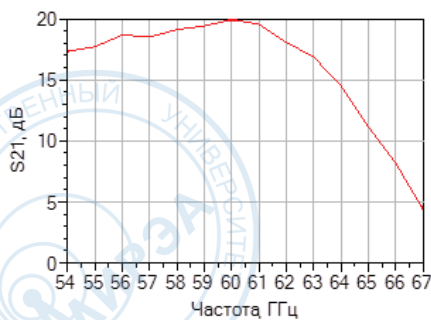


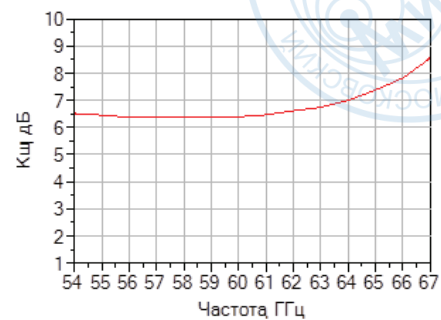
Рис. 8. Топологический проект четырехкаскадного усилителя.

Результаты электродинамического расчета топологического проекта четырехкаскадного усилителя в САПР ADS представлены на рис. 9. Как видно из приведенных графиков, построенных для напряжения питания 5 В, в диапазоне частот 57–64 ГГц коэффициент передачи составляет 15–20 дБ, КСВН по входу и выходу менее 2, коэффициент шума – примерно 6.4 дБ.

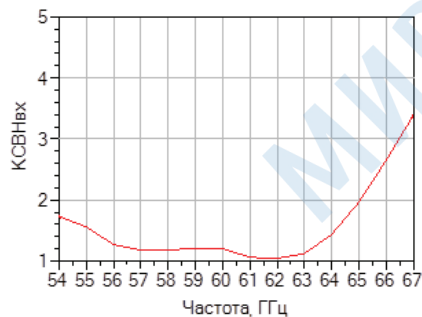
Таким образом, согласно полученным результатам расчетов, требуемые параметры достижимы. Расчетный ток потребления усилителя составил 70–100 мА [12].



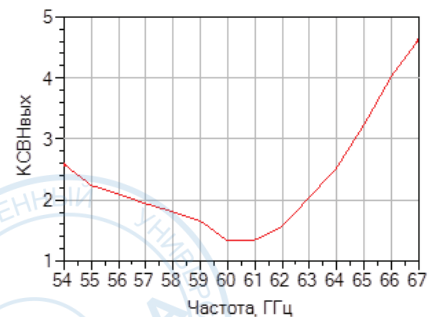
а) зависимость коэффициента передачи от частоты



б) зависимость коэффициента шума от частоты



в) зависимость КСВН по входу от частоты



г) зависимость КСВН по выходу от частоты

Рис. 9. Расчетные характеристики МШУ для диапазона 57–64 ГГц.

3. Формирование межэлектрических соединений, обеспечивающих общую «землю»

Особенностью технологического маршрута, помимо стандартных для нитридной технологии этапов, явился процесс формирования межэлектрических соединений, обеспечивающих общую «землю». На «заземляющую плоскость» должны быть выведены истоки транзисторов и «земли» элементов МИС через металлизированные отверстия, что обеспечит общий электрический контакт одного общего электрода. Схемы на арсениде галлия достаточно легко утончаются до толщин менее 100 нм и хорошо химически травятся, обеспечивая, таким образом, возможность изготовления сквозных отверстий с металлизацией обратной стороны. В схемах на нитриде галлия создание «заземляющей плоскости» при микрополосковой технологии связано с серьезными технологическими трудностями: невозможностью сверления отверстий в подложках сапфира, низкой скоростью травления подложек из SiC, еще более низкой скоростью травления буферного слоя AlGaIn/GaN. Частично решение данной проблемы может быть облегчено при переходе к наногетероструктурам на кремниевых подложках, но в настоящее время такие наногетероструктуры недоступны.

Найдено конструкторско-технологическое решение данной проблемы, заключающееся в создании «заземляющей плоскости» не с обратной стороны, а сверху лицевой поверхности пластины [13], то есть слой металла наносится поверх слоя полимерного диэлектрика (фотолак, разработка ИВС РАН), который, в свою очередь, нанесен поверх уже изготовленных элементов МИС. При этом заземление соответствующих элементов производится через отверстия в слое фотолака, одновременно выполняющего роль защитной пассивации; поперечное сечение пластины показано на рис. 10.

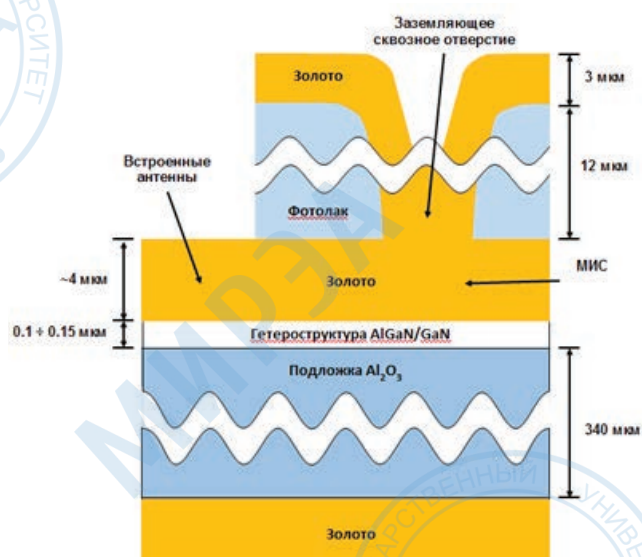


Рис. 10. Поперечное сечение пластины с фотолак.

Использовали фотолак толщиной 12 мкм, в котором формировался рисунок со вскрытыми окнами для доступа к контактным площадкам, в фотолаке также могут быть сделаны окна для встроенных антенн.

4. Измерения МИС МШУ для диапазона 57–64 ГГц

Выполнены измерения малосигнальных S-параметров и коэффициента шума кристаллов МШУ (внешний вид показан на рис. 11). Измерения проводили после нанесения фотолака и резки пластины на кристаллы.

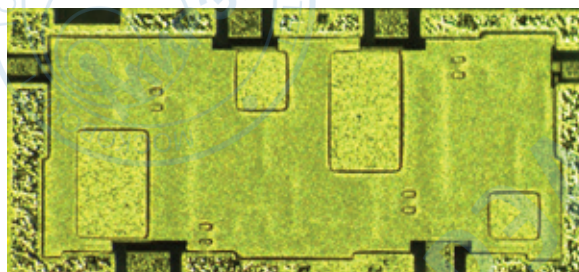
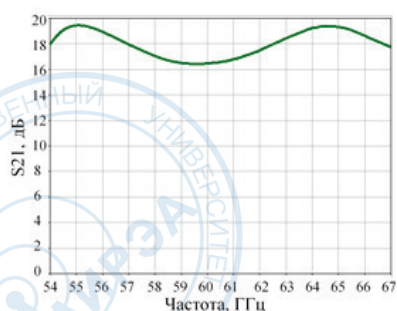


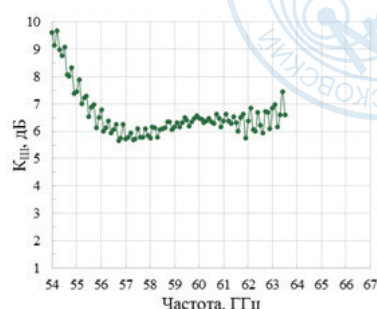
Рис. 11. Внешний вид МШУ после нанесения фотолака с верхней металлизацией.

Измерения кристаллов проводили зондовым способом, без оснастки и теплоотвода, в непрерывном режиме по питанию. При измерении малосигнальных S-параметров определяются: коэффициент передачи, КСВН входа и выхода и ток потребления, отдельно измеряли коэффициент шума.

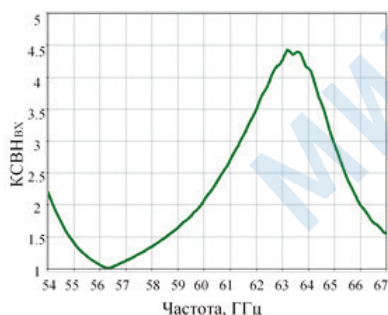
На рис. 12 показаны результаты измерений типового образца МШУ.



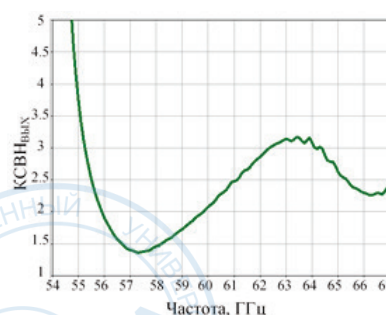
а) зависимость коэффициента передачи от частоты



б) зависимость коэффициента шума от частоты



в) зависимость КСВН по входу от частоты



г) зависимость КСВН по выходу от частоты

Рис. 12. Измеренные характеристики типового образца МШУ.

Зависимость малосигнального коэффициента усиления от частоты, несмотря на не-большой сдвиг в более низкочастотную область, имеет хорошую однородность в рабочем диапазоне 57–64 ГГц и имеет значение более 16 дБ. При этом зависимость КСВН входа от частоты имеет пик возрастания в середине рабочего диапазона, и этот пик сильно сужает выбор оптимальной рабочей частоты (необходимым условием является КСВН входа и выхода менее 2). КСВН выхода не имеет такого явного пика возрастания, но имеет ярко выраженную точку минимума на частоте 57–58 ГГц. Результаты измерений коэффициента шума показали наличие минимума у всех образцов на частоте 57 ГГц и дальнейшее возрастание с повышением частоты. Таким образом, с точки зрения значения коэффициента шума, оптимальной является работа усилителя на более низкой частоте рабочего диапазона 57–64 ГГц.

В целом, измерения показали хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов. Все измеренные образцы достигают требуемых значений всех характеристик в диапазоне 57–64 ГГц. При этом оптимальная рабочая точка подавляющего большинства усилителей находится на частоте 57 ГГц, кроме тех образцов, в которых на этой частоте наблюдается пик КСВН входа, для этих образцов оптимальная рабочая точка сдвинута в более высокочастотный диапазон.

Заключение

Разработанный усилитель является единственным устройством, разработанным на гетероструктурах нитрида галлия – широкозонного полупроводника. Помимо положительных свойств, обусловленных использованием в качестве материала гетероструктуры полупроводника с широкой запрещенной зоной, наблюдается чуть большее, чем у аналогов, значение коэффициента шума. При этом разработанный усилитель не требует ограничителя мощности на входе, который необходим для усилителей на гетероструктурах GaAs и ухудшает их суммарный уровень шума. Отметим, что согласно последним работам [14], в оптимальных условиях изготовления нитридные HEMT-транзисторы могут иметь более низкий коэффициент шума, чем арсенидные. По совокупности характеристик усилитель ИСВЧПЭ РАН находится на уровне лучших мировых образцов. В перспективе характеристики МШУ на нитриде галлия могут быть улучшены за счет совершенствования технологии и освоения отечественных подложек из карбида кремния, совершенствования гетероструктур и повышения MaxGain транзисторов, а также использования теплоотвода [15].

Литература:

1. TriQuint, TGA4600, 60GHz Low Noise Amplifier, Product Datasheet. URL: <http://www.triquint.com/products/p/TGA4600> (дата обращения 01.05.2016)
2. Sumitomo Electric Device Innovations Inc., FMM5716X, 60GHz Low Noise Amplifier, Product Datasheet. URL: <http://www.sedi.co.jp/data.jsp?version=en&database=wireless&id=6634&class=01020400> (дата обращения 01.05.2016)
3. United Monolithic Semiconductors, CHA2159, 55-65GHz Low Noise / Medium Power Amplifier, Product Datasheet. URL: <http://www.ums-gaas.com/all-products-selection-guide.php> (дата обращения 01.05.2016)

4. United Monolithic Semiconductors, CHA2157, 55-60GHz Low Noise / Medium Power Amplifier, Product Datasheet. URL: <http://www.ums-gaas.com/all-products-selection-guide.php> (дата обращения 01.05.2016)
5. Microsemi Corporation, MMA034AA; MMA035AA; MMA036AA, MMIC Selection Guide, Product Datasheet. URL: <http://www.microsemi.com/products/mmic/low-noise-amplifiers> (дата обращения 01.05.2016)
6. Analog Devices, Inc., HMC-ALH382, GaAs HEMT LOW NOISE, Product Datasheet. URL: <http://www.analog.com/en/products/amplifiers/rf-amplifiers/hmc-alh382-die.html> (дата обращения 01.05.2016)
7. RF-LAMBDA, R50G69GSA, Low Noise Amplifier 50-69GHz NF:3.8dB, Product Datasheet. URL: http://www.rflambda.com/product_list.jsp?catalog=67 (дата обращения 01.05.2016)
8. RF-LAMBDA, R50G69GSB, Low Noise Amplifier 50-69GHz, Product Datasheet. URL: http://www.rflambda.com/product_list.jsp?catalog=67 (дата обращения 01.05.2016)
9. RF-LAMBDA, R50G69GSC, Low Noise Amplifier 50-69GHz NF:3.8dB, Product Datasheet. URL: http://www.rflambda.com/product_list.jsp?catalog=67 (дата обращения 01.05.2016)
10. Ducommun Incorporated, ALN-61086015; ALN-61086030, Low Noise Amplifier, Product Datasheet. URL: <http://www.ducommun.com/engineeredolutions/millimeterwave/amplifiers.aspx> (дата обращения 01.05.2016)
11. Мальцев П.П., Матвеев О.С., Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Крапухин Д.В., Зуев А.В., Бунегина С.Л. Монолитная интегральная схема усилителя со встроенной антенной для пятимиллиметрового диапазона длин волн // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2014. № 4 (108). С. 73–76.
12. Крапухин Д.В., Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Матвеев О.С., Зуев А.В. Моделирование и проектирование монолитной интегральной схемы маломощного усилителя со встроенной антенной для диапазона 57–64 ГГц // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2015. Т. 15. № 4. С. 49–52.
13. Федоров Ю.В., Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л., Крапухин Д.В., Путинцев Б.Г., Павлов А.Ю., Зуев А.В. МИС усилителей со встроенными антеннами СВЧ-диапазона на наногетероструктурах // Наноиндустрия. 2015. № 3. С. 44–51.
14. Федоров Ю.В., Михайлович С.В. Влияние параметров наногетероструктур и технологии изготовления на шумовые свойства AlGaIn/GaN HEMT // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 10. С. 12–17.
15. Галиев Р.Р., Гнатюк Д.Л., Зуев А.В., Крапухин Д.В., Майтама М.В., Матвеев О.С., Михайлович С.В., Федоров Ю.В., Щербакова М.Ю. Нитридные технологии для освоения миллиметрового диапазона длин волн // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 2. С. 21–32.

УДК 334

АНАЛИЗ КОЛЛАБОРАТИВНОСТИ КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ МЕЖОРГАНИЗАЦИОННЫМИ ВЗАИМООТНОШЕНИЯМИ ПРЕДПРИЯТИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Н.Н. Куликова, доцент

*Кафедра финансов и организации бюджетного процесса,
Московский технологический университет, Москва, 119454 Россия
@Автор для переписки, e-mail: karpuxinanatasha@yandex.ru*

С целью проектирования и изготовления микроэлектронного изделия профессиональные участники российского рынка микроэлектроники образуют на временной основе межорганизационные взаимоотношения на основе коллаборативности. В статье представлен авторский взгляд на необходимость управления процессом коллаборативности межорганизационных взаимоотношений предприятий микроэлектроники при реализации ими технологической цепочки ценностей. Коллаборативность представляется как стремление и способность партнеров к сотрудничеству, направленное на совместное достижение общих целей. Предлагается при помощи матрицы производить оценку взаимосвязанности целей и интересов партнеров, их умений и желаний осуществлять координационные действия и вероятности успеха межорганизационных взаимоотношений. Автором разработан инструмент стратегического анализа универсального характера, который может быть использован компаниями, образующими межорганизационные взаимоотношения и связи в других отраслях.

Ключевые слова: межорганизационные взаимоотношения, сотрудничество, коллаборация, профессиональные участники российского рынка микроэлектроники.

ANALYSIS OF COLLABORATIVE AS MANAGEMENT TOOL INTER-ORGANIZATIONAL RELATIONSHIPS IN THE ELECTRONICS INDUSTRY ENTERPRISE

N.N. Kulikova

*Moscow Technological University, Moscow, 119454 Russia
@Corresponding author e-mail: karpuxinanatasha@yandex.ru*

For the design and manufacture of microelectronic products professional participants of the Russian microelectronics market on a temporary basis constitute inter-organizational relationships based on collaborative. In the article the author's view on the need to manage the process of collaborative inter-organizational relationships microelectronics enterprises in the implementation of the technological value chain. The collaborative presented as the willingness

and ability of partners to cooperation aimed at sharing common goals. It proposed using the matrix to assess the interconnectedness of the goals and interests of the partners and their ability and desire to carry out the coordination of action and the likelihood of inter-organizational relations success. The author developed a tool of strategic analysis of the universal nature, which can be used by companies, forming inter-organizational relationships and connections in other industries.

Keywords: inter-organizational relationships, cooperation, collaboration, professional participants of the Russian market of microelectronics.

Введение

Электронная промышленность определяет научно-технический прогресс и является базовой отраслью для всех остальных сфер экономики страны. Поэтому в РФ развитие электронной промышленности, особенно микроэлектроники, является приоритетным направлением технической политики государства. Наиболее наукоемкие и технологически сложные изделия электронной промышленности – изделия микроэлектроники.

Технологическая цепочка ценностей микроэлектронного изделия сегодня реализуется преимущественно на основе межорганизационных взаимоотношений. Межорганизационные взаимоотношения предприятий микроэлектроники – это сотрудничество и комбинирование технологий, ноу-хау, компетенций и ресурсов [1, 2]. Для обеспечения такого взаимодействия в 2007 г. в РФ была принята «Стратегия развития электронной промышленности России на период до 2025 года». Она направлена «на реализацию мероприятий по обеспечению разработки и организации выпуска отечественной электронной компонентной базы (ЭКБ)» [3] и определяет всех профессиональных участников отрасли, создающих совместную технологическую цепочку ценностей, базирующуюся на коллаборативности. К профессиональным участникам российского рынка микроэлектроники относят фаблесс-компании, фабрики-фаундри, дизайн-центры, фабрики по сборке электронных компонентов и испытательные центры.

Чтобы достичь успеха в межорганизационных взаимоотношениях профессиональных участников российского рынка микроэлектроники, которые в современных условиях развития отрасли имеют тенденцию к повторению, возникает необходимость оценки стремлений и способностей каждого из партнеров к сотрудничеству при реализации ими общей цели и выявления противоречий и конфликтов, случаев недоверия и нежелания взаимодействовать.

Профессиональному участнику российского рынка микроэлектроники не обязательно иметь всё необходимое для реализации этапов жизненного цикла (ЖЦ) микроэлектронного изделия [4]. В настоящее время успешная реализация этапов ЖЦ микроэлектронного изделия определяется долгосрочными и тесными взаимоотношениями предприятий-партнеров [5], а для малых инновационных предприятий, имеющих незначительные ресурсы, межорганизационные взаимоотношения приобретают особое значение [6].

Сотрудничество ценно, потому что это, во-первых, хороший способ для достижения целей, которые трудно или невозможно достичь в одиночку [7]; во-вторых, оно является возможностью снижения рисков и распределения рисков и затрат между всеми участниками [8] технологической цепочки ценностей; в-третьих, наличие редких ресурсов, компетенций и технологий предоставляет конкурентные преимущества для всех предприятий-партнеров [9]. Поэтому сотрудничество может помочь в решении множества

проблем, которые не могут быть решены в индивидуальном порядке [10]. Применительно к профессиональным участникам российского рынка микроэлектроники, благодаря объединению знаний и идей, сотрудничество помогает принять решение, как использовать имеющиеся компетенции, технологии и мощности, а также как разрабатывать новые.

Сотрудничество профессиональных участников рынка микроэлектроники реализуется на основе координации функциональной деятельности предприятий на всех этапах ЖЦ микроэлектронного изделия, иными словами – на основе коллаборации между предприятиями-партнерами.

Понятие и характеристики коллаборативности межорганизационных взаимоотношений

В работах зарубежных и российских исследователей [11–17] коллаборация представляется как сотрудничество, направленное на достижение общих целей и взаимных выгод.

Полтерович В.М. [18] определяет коллаборативность как способность и стремление к сотрудничеству.

Gray B. и Hickman G.R. [19, 20] рассматривают коллаборативность как процесс, посредством которого партнеры, имеющие различные мнения относительно одной и той же проблемы, могут конструктивно подходить к разногласиям и находить решения, которые выходят за рамки индивидуального видения каждого партнера.

Под коллаборативностью межорганизационных взаимоотношений предприятий рынка микроэлектроники мы будем понимать стремление и способность к сотрудничеству, направленное на достижение общей цели взаимодействия, единой для всех участников-партнеров, и взаимных выгод, путем объединения необходимых ресурсов, компетенций и технологий для проектирования и разработки микроэлектронного изделия. Стремление к сотрудничеству определяется получением выгоды или достижением предприятием собственных целей через партнерство. А.В. Шмаков считает [21], что единственной мотивацией к сотрудничеству является стремление к максимизации индивидуального благосостояния через договорные взаимоотношения.

Межорганизационные взаимоотношения предполагают, что все участники-партнеры работают на последовательных этапах технологической цепочки ценностей и предпринимают совместные усилия по созданию и поддержанию общих конкурентных преимуществ за счет объединения интеллектуальных, маркетинговых, финансовых ресурсов и мощностей [22]. Участники отказываются от своих автономных позиций на рынке: объединяют ресурсы, совместно используют мощности и компетенции. Каждый участник межорганизационных взаимоотношений получает от своих партнеров пользу и выгоду, например, используя для своего имиджа конкурентные преимущества партнеров.

Однако стремление к сотрудничеству еще не гарантирует успех: для этого необходимо наличие способности к сотрудничеству.

Способность к сотрудничеству предприятия при реализации межорганизационных взаимоотношений определяется умением формулировать свою цель и согласовывать ее с другими участниками-партнерами, а также готовностью к координации действий для эффективной совместной работы с партнерами. Такая способность к согласованию целей и действий на основе совокупности координационных механизмов сегодня становится конкурентным преимуществом профессиональных участников российского рынка ми-

кроэлектроники, так как является ключевым моментом на пути к успеху, а в некоторых случаях – к выживанию.

В конечном счете, степень стремления и способности к сотрудничеству всех предприятий-партнеров межорганизационных взаимоотношений определяет эффективность организационной и производственной структуры каждого участника партнера, образующих единую технологическую цепочку ценностей на основе коллаборативности.

М. Сао и Q. Zhang [23] выделяют семь взаимосвязанных характеристик коллаборативности:

- 1) обмен информацией: предприятия-партнеры своевременно обмениваются релевантной, точной, полной и конфиденциальной информацией между собой;
- 2) согласованность целей: для достижения собственных целей участникам-партнерам придется пойти на компромисс ради достижения главной цели межорганизационных взаимоотношений;
- 3) координация деятельности: предприятия-партнеры для реализации преимуществ межорганизационных взаимоотношений должны координировать свои действия с другими участниками;
- 4) взаимное распределение рисков и ответственности: необходимо распределить затраты, риски и ответственность между всеми предприятиями-партнерами, а не делать ответственным за неудачи только одно предприятие;
- 5) объединение ресурсов и технологий: каждый участник должен вносить свой индивидуальный вклад в межорганизационные взаимоотношения в виде ресурсов, технологий и персонала с ключевыми компетенциями;
- 6) коммуникации: реализация формальных и неформальных коммуникаций между всеми предприятиями-партнерами;
- 7) создание совместных знаний, идей, инноваций: межорганизационные взаимоотношения позволяют предприятиям-партнерам развиваться, лучше понимать и реагировать на потребности заказчика и конкурентной среды путем совместной работы.

Кроме этого, дополнительно можно выделить следующие характеристики коллаборативности межорганизационных взаимоотношений профессиональных участников российского рынка микроэлектроники:

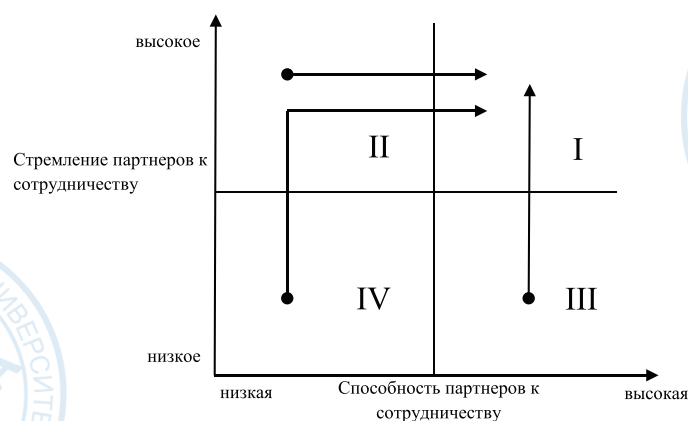
- наличие координатора, который осуществляет контроль всего ЖЦ микроэлектронного изделия (координатором технологической цепочки ценностей выступают дизайн-центры общего назначения или фаблесс-компании);
- наличие баланса между целями участников-партнеров и главной целью межорганизационных взаимоотношений, которую определяет координатор технологической цепочки ценностей;
- возможность укрепления имиджа и доверия к участникам-партнерам на рынке микроэлектроники;
- наличие государственной поддержки – государственного контракта на выполнение опытно-конструкторской работы.

Матрица коллаборативности межорганизационных взаимоотношений

Очень важно, чтобы коллаборативность межорганизационных взаимоотношений профессиональных участников российского рынка микроэлектроники, создающих со-

вместную ценность, принесла желаемый результат, который может быть достигнут только в том случае, если цели каждого отдельного участника определены, согласованы с другими участниками-партнерами и не противоречат им. Необходим определенный баланс между главной целью межорганизационных взаимоотношений, целями участников-партнеров и целями отдельных членов участников-партнеров [1]. Относительная значимость главной цели межорганизационных взаимоотношений меняется по мере удовлетворения целей участников-партнеров, поэтому степень коллаборативности является переменной величиной и зависит от предпочтений каждого участника-партнера [18].

Таким образом, выделив два основных условия коллаборативности межорганизационных взаимоотношений профессиональных участников российского рынка микроэлектроники (стремление и способность предприятия-партнера к сотрудничеству), можно определить возможное текущее состояние партнерства предприятий и возможные дальнейшие стратегические действия и решения. Построим матрицу, которая представляет собой таблицу, состоящую из четырех квадрантов (рисунок). Каждый из них характеризует степень стремления и способности к сотрудничеству предприятий, образующих межорганизационные взаимоотношения.



Матрица коллаборативности межорганизационных взаимоотношений.

Матрица дает представление о взаимосвязи целей и интересов каждого предприятия в партнерстве, умении и желании осуществлять координацию действий партнеров в технологической цепочке ценностей, и, в конечном счете, успехе межорганизационных взаимоотношений профессиональных участников российского рынка микроэлектроники. Каждый квадрант матрицы отражает степень коллаборативности межорганизационных взаимоотношений профессиональных участников российского рынка микроэлектроники, образующих общую технологическую цепочку ценностей для реализации ЖЦ микроэлектронного изделия. Оценивается положение каждого предприятия-участника межорганизационных взаимоотношений и отмечается на матрице. Наилучшими в стремлении и способности к сотрудничеству считаются партнеры в квадранте I, так как они гарантируют высокие значения по двум показателям и обеспечивают достижение цели межорганизационного взаимоотношения. Если ни одно из предприятий-участников межорганизационных взаимоотношений не попадает в квадрант I или там оказываются не все предприятия-участники межорганизационных взаимоотношений, то необходимо экстренно вводить координационные механизмы (взаимное согласование, прямой контроль,

стандартизацию) [24]. Крайне важно наличие высокого авторитета координатора технологической цепочки ценностей (дизайн-центра общего назначения или фаблесс-компании), детального планирования, частых проверок соблюдения графиков работ и тесной формальной и неформальной координации между всеми участниками-партнерами, что, естественно, потребует много времени и усилий.

Если предприятия-участники межорганизационных взаимоотношений попали в квадранты II, III и IV матрицы, это может свидетельствовать о наличии взаимосвязанных проблем и конфликтов между ними:

- партнеры понимают, что необходимо наличие общих целей межорганизационных взаимоотношений, но они не могут согласиться на них;
- очень важным является разделение полномочий, но партнеры навязывают свои условия;
- доверие необходимо для успешных межорганизационных взаимоотношений, но партнеры с подозрением относятся друг к другу;
- предприятие изнуряет партнерство из-за постоянной необходимости выполнения директив, инструкций и указаний;
- руководящая роль в межорганизационных взаимоотношениях не всегда принадлежит одному из участников-партнеров – руководить может внешнее по отношению к партнерству предприятие;
- лидер, выполняющий руководящие функции в межорганизационных взаимоотношениях, постоянно сталкивается с проблемами выбора и сложностями.

Анализируя деятельность профессиональных участников российского рынка микроэлектроники, помехами успешной коллаборативности также могут быть:

- несогласованность интересов относительно использования прав интеллектуальной собственности;
- различия в понимании необходимости наличия функциональных работ, ресурсов, компетенций и мощностей на различных этапах ЖЦ микроэлектронного изделия;
- несогласованность действий из-за различий в понимании при решении оперативных задач, например, неэффективное управление проектом.

Заключение

Проблемы и помехи в основном имеют место из-за инерции партнеров, которая может возникать в любой момент при реализации межорганизационных взаимоотношений профессиональных участников российского рынка микроэлектроники. Управление коллаборативностью межорганизационных взаимоотношений не предполагает простых ответов, но можно добиться хороших результатов, если есть понимание, что коллаборация – это сложная и динамичная совместная деятельность, реализуемая в большей степени вне пределов функций управления отдельных предприятий-партнеров.

Итак, коллаборативность межорганизационных взаимоотношений – это деятельность, которой трудно управлять и поддерживать без организованной совместной работы по согласованию интересов и действий, без обязательств и вклада каждого предприятия-партнера при достижении ими общей цели. Поэтому при реализации межорганизационных взаимоотношений очень важно понимание степени стремления и способности каждого предприятия-партнера к сотрудничеству.

Литература:

1. Куликова Н.Н. Модель межорганизационных взаимоотношений в электронной промышленности // Проблемы современной экономики. 2016. № 2 (58). С. 98–101.
2. Kodama T. Industry-Academic and Inter-corporate Collaboration in TAMA (Technology Advanced Metropolitan Area). RIETI Discussion Paper Series 02-E-014, 2002. 66 p.
3. Приказ Министерства промышленности и энергетики РФ от 7 августа 2007 г. № 311 «Об утверждении Стратегии развития электронной промышленности России на период до 2025 года».
4. Lehoux N., D'Amours S., Lavgevin A. A win-win collaboration approach for a two-echelon supply chain: a case study in the pulp and paper industry // Eur. J. Ind. Eng. 2008. No. 4(4). P. 493–514.
5. Najafian M., Colabi A.M. Inter-organizational relationship and innovation: A review of literature // Global Business and Management Research: An International Journal. 2014. No. 6 (1). P. 52–70.
6. Jenssen J.I., Nybakk E. Inter-organizational networks and innovation in small, knowledge-intensive firms: A literature review // Int. J. Innovation Management. 2013. No. 17 (2). P. 27–66.
7. Huxham C. Creating Collaborative Advantage. London: Sage Publications Ltd, 1996. P. 1–18.
8. Parker H. Inter-firm collaboration and the new product development process // Industrial Management & Data Systems. MCB University Press, 2000. No. 100(6).
9. Barney J., Wright M., Ketchen D. The resource-based view of the firm: Ten years after 1991 // J. Management. 2001. No. 27. P. 625–641.
10. Roshani M., Lehoux N., Frayret J.-M. University-Industry Collaborations and Open Innovations: An Integrated Methodology for Mutually Beneficial Relationships. Canada: CIRRELT, 2015. 33 p.
11. Ларионова И.Г. Квазинтеграционные процессы в полиграфическом комплексе Краснодарского края // Современная экономическая мысль. 2013. № 3. С. 18–26.
12. MacGregor S.P., Carleton T. Sustaining Innovation. Collaboration Models for a Complex World. New York: Springer, 2012. 195 p.
13. Manthou V., Vlachopoulou M., Folinas D. Virtual e-Chain (VeC) model for supply chain collaboration // Int. J. Production Economics. 2001. No. 87(3). P. 241–250.
14. Mentzer J.T., DeWitt W., Keebler J.S., Min S., Nix N.W., Smith C.D., [et al.] Defining supply chain management // J. Business Logistics. 2001. No. 22(2). P. 1–25.
15. Mohr J., Spekman R.E. Characteristics of partnership success: partnership attributes, communication behavior, and conflict resolution techniques // Strategic Management J. 1994. No. 15(2). P. 135–152.
16. Sheu C., Yen H.R., Chae D. Determinants of supplier-retailer collaboration: Evidence from an international study // Int. J. Operations & Prod. Management. 2006. No. 26(1). P. 24–49.
17. Stank T.P., Keller S. B., Daugherty P.J. Supply chain collaboration and logistical service performance // J. Business Logistics. 2001. No. 22(1). P. 29–48.
18. Полтерович В.М. От социального либерализма – к философии сотрудничества // Общественные науки и современность. 2015. № 4. С. 41–64.

19. Gray B. Collaborating: Finding Common Ground for Multiparty Problems. San Francisco: Jossey-Bass, 1989. 358 p.
20. Hickman G.R. Leading Organizations Perspectives for a New Era. Third ed. University of Richmond, 2015. 808 p.
21. Шмаков А.В. Стремление к экономическому сотрудничеству как мотив экономического поведения // TERRA ECONOMICUS. 2010. Т. 8. № 4. С. 57–61.
22. Шерешева М.Ю. Формы сетевого взаимодействия компаний. М.: Изд. дом Гос. ун-та – Высшей школы экономики, 2010. 339 с.
23. Cao M., Zhang Q. Supply Chain Collaboration Roles of Interorganizational Systems, Trust, and Collaborative Culture. Springer, 2013. 201 p.
24. Куликова Н.Н. Координация межорганизационных взаимоотношений при формировании цепочки ценностей в электронной промышленности // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2016. № 2. С. 151–168.

УДК 378.09

**ПОДГОТОВКА ВЫСОКОКВАЛИФИЦИРОВАННЫХ
СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ
КАК ФАКТОР УСПЕШНОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ РОССИИ**

Е.В. Бодрова[@], заведующий кафедрой «История»

А.Р. Пирумов, доцент кафедры «Техническая механика»

Московский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@Автор для переписки, e-mail: evbodrova@mail.ru

В статье проанализирован отечественный и зарубежный опыт инженерной подготовки, выявлены проблемы, с которыми столкнулась высшая техническая школа РФ в настоящее время, предложены практические рекомендации по повышению качества инженерного образования. Сформулирован вывод о том, что воспроизводство кадрового потенциала научно-технического комплекса страны должно стать одним из важнейших стратегических направлений в условиях преодоления кризиса, необходимости осуществления технологического рывка и ускорения темпов модернизации.

Ключевые слова: инженерное образование, высшая техническая школа, качество образования, бакалавриат, магистратура.

**HIGH-SKILLED TECHNOLOGY AND ENGINEERING
PROFESSIONALS TRAINING AS A KEY FACTOR
OF RUSSIAN FEDERATION SUCCESSFUL MODERNIZATION**

E.V. Bodrova[@],

A.R. Pirumov

Moscow Technological University, Moscow, 119454 Russia

@Corresponding author e-mail: evbodrova@mail.ru

The article presents the analysis of domestic and foreign engineers training experience. Current problems the Russian Federation Higher Technical Education has faced are specialized as well as practical recommendations for engineering education quality improvement are proposed. It has been concluded that our country science and technology manpower regeneration should become one of the most important strategic directions amid the recovery from crisis, technological breakthrough and acceleration of modernization rate necessity.

It is claimed that rather often technical university graduates lack in both knowledge of innovative technologies and adequate experience in research work. The authors consider that the main reasons of graduates low-level competency are the result of inadequate education requirements at school, lack of Higher education financing and specialist's to bachelor's programmes' transformation.

Keywords: engineering education, higher technical school, education quality, bachelor's degree programme, master's degree programme.

Качественное инженерное образование является необходимым фактором существования и, тем более, развития любого крупного государства. При дефиците квалифицированных инженеров со временем начнут выходить из строя системы жизнеобеспечения государства: от небольших бытовых проблем до крупных техногенных катастроф. Как следствие, серьезно увеличивается нагрузка на экономику и финансовую стабильность страны, происходит рост социально-политической напряженности. В небольшой стране подготовка инженерно-технических кадров частично может осуществляться за рубежом. Возможно и приглашение иностранных специалистов, как это было в дореволюционной России. Только при Петре I начали заботиться о воспитании национальных кадров. По сути, именно в XVIII веке начинается становление высшей технической школы (ВТШ) России, а в середине следующего века создается система высшего инженерного образования, качество которого к началу XX в. признавалось лучшим в мире. В работе авторского коллектива под руководством Е.П. Велихова сформулирован, на наш взгляд, справедливый вывод о том, что «история инновационного развития России в XIX–XX вв. – это, прежде всего, почти двухсотлетняя история становления и развития русской инженерной школы и системы инженерного образования России. Инженерная школа России в течение двух веков была государственным инструментом, обеспечивающим решение насущной государственной проблемы достижения технологического лидерства или, как минимум, паритета с промышленно развитыми странами в ключевых военных и гражданских областях. И постановка, и решение этой государственной проблемы, очевидно, были возможны только в условиях единого государственного целеполагания для триады: наука, образование и промышленность. Русская инженерная школа «... основывалась на идее единства этой триады при ведущей роли ее промышленной компоненты» [1].

В нынешней весьма сложной геополитической и экономической ситуации восстановление данной триады более чем актуально, поскольку политика антироссийских санкций продемонстрировала наши уязвимые места. Проблемы с импортозамещением возникли в отраслях тяжелой промышленности. Одни санкции являются политическим жестом, другие – могут сказаться на качестве жизни населения, либо направлены на ослабление и дестабилизацию страны. В свое время против Советского Союза были введены и более жесткие ограничения, но они не оказывали решающего воздействия на техническое развитие. Модернизация советского образца предполагала самодостаточность и самообеспечение. Получение каких-то комплектующих для оборонной промышленности из-за рубежа и, тем более, из стран НАТО вообще не рассматривалось: всё необходимое производилось внутри страны. Это касается и формирования национальных кадров для промышленности, для оборонного комплекса. Увеличивалось количество вузов, студентов, реконструировалась материально-техническая база. В эти годы создавались советы ректоров высших учебных заведений, которые отвечали за координацию учебной, идейно-воспитательной и научно-исследовательской деятельности вузов, функционировал Совет по высшей школе при Министерстве высшего и среднего специального образования СССР. Публикации научных исследований финансировались за счет государства. Процент выполнения научной тематики вузов достигал 88.5. В целом в 1950–60-е гг. в СССР престиж высшего образования и уровень инженерной подготовки были высокими.

В числе специалистов с высшим образованием к концу 1950-х гг. инженеры составляли 27%, к концу 1960-х гг. – 32%. В 1960 г. выпускниками советских вузов стали 120 тыс. инженеров, в США – 38 тыс. В последующее десятилетие численность инженеров в СССР выросла на 340% [2]. Сохранившаяся часть советского промышленного потенциала и ВПК была настолько мощной, что долгое время не только обеспечивала военный паритет России на мировой арене, но и демонстрировала высокий уровень жизнестойкости в условиях форсированной деиндустриализации страны в 1990-е гг. [3].

Введенные против России санкции со временем будут ослаблены, но сама подобная политика ряда стран показывает, что они в любой момент могут быть снова введены либо с целью давления на нашу страну, либо в попытке уничтожения РФ как единого государства.

Парадоксально, но введение санкций, надеемся, окажется полезным для будущего. В результате руководство страны вынуждено пересматривать отношение к техническому перевооружению, развитию машиностроения и приборостроения. Определенные положительные сдвиги уже можно фиксировать. В ряду самых острых проблем стоит обеспечение достаточного количества инженерно-технических кадров и качества их подготовки. Это в полной мере осознают и лидеры РФ. Так, в Послании Федеральному Собранию Президентом была определена роль качественной подготовки инженеров как базового условия развития экономики [4]. Государством в сфере финансирования ВТШ было сделано достаточно много: начиная с 2006 г., в развитие материальной базы инженерных факультетов целевым образом вложено более 54 млрд. рублей. В результате удалось повысить уровень подготовки специалистов, в том числе по таким критически важным направлениям, как авиационная, атомная, автомобильная промышленность, металлургия, энергетическое машиностроение. Вырос престиж профессии [5].

Однако существует и значительное количество проблем. Уровень профессионализма и компетентности специалистов российских компаний, как было заявлено на заседании Совета при Президенте по науке и образованию в июне 2014 г., оказался на 30% ниже, чем у их зарубежных коллег, что значительно снижало конкурентоспособность отечественной промышленности [5]. Во многом это явилось следствием решения о подготовке инженерными вузами не инженеров, а бакалавров, что резко ограничивает возможности высшей школы по выпуску высококвалифицированных кадров. В 2013 г. работодатели оценили уровень подготовки выпускников технических вузов в 3.7 балла по пятибалльной шкале. По их мнению, около 40% выпускников нуждалось в дополнительной подготовке [6].

В настоящее время возраст научных и инженерно-технических кадров в КБ, НИИ, на предприятиях военно-промышленного комплекса, преподавателей вузов естественных, машино- и приборостроительных кафедр в основном превышает 50 лет, причем довольно многим уже за 70. Приток молодых кадров крайне мал, а уровень их подготовки оставляет желать лучшего. Похожая картина наблюдается и среди квалифицированных рабочих, занятых в указанных организациях. Следует отметить, что на «гуманитарных» и «компьютерных» специальностях разрыва поколений нет, специалистов хватает, даже с избытком. Такое положение сознают и в руководстве страны. О том, что «экономистов и юристов» мы подготовили на десятилетия вперед, стали говорить с 2010 года и президент, и премьер-министр. Обеспокоенность нарастающим дефицитом технических специалистов еще в 2010 г. высказал В.В. Путин в своей статье, опубликованной в

немецкой *Suddeutsche Zeitung*. Вице-премьер Д. Рогозин, который возглавил руководство оборонно-промышленным комплексом и непосредственно столкнулся с подготовкой кадров для этих отраслей, свою статью на ту же тему в Российской газете в 2014 г. озаглавил: «Сейчас знания становятся оружием не менее мощным, чем ракеты и пушки» [7].

Инженерно-технические кадры условно можно разделить на две группы: те, кто создает новую технику и технологии, и те, кто ее производит и поддерживает. Первая группа относительно немногочисленна, и даже при хорошем качестве инженерного образования нужен еще и талант, чтобы стать изобретателем, инженером-исследователем, конструктором или ученым. Однако, если не обеспечить по-настоящему одаренных людей качественным образованием, их талант и возможности не будут реализованы. Вторая группа: инженеры (производственники и инженеры – эксплуатационники) – это миллионы, и их нехватка ощущается уже сейчас, а перспективы еще менее радужные. И если количество хоть как-то можно регулировать с помощью выделения определенного числа бюджетных мест на первый курс на технические и естественнонаучные специальности, то с качеством подготовки дела обстоят намного хуже, причем во многом потому, что уровень подготовки школьников заметно снизился. Это особенно заметно тем, кто оканчивал школу в советский период. Если не приводить примеры отдельных хороших школ и отдельных учителей, то сейчас оценка «отлично» ставится часто за то, за что раньше не всегда поставили бы «хорошо». По сравнению с советским периодом, в школьной программе XXI века заметно сократилось преподавание основных технических дисциплин – математики и физики. Но именно математика «форматирует мозг», развивает у ребенка способность к логическому мышлению. Уровень школьной подготовки в среднем по шкале ЕГЭ – от 25 до 60 баллов (логическое мышление для этого не нужно). В переводе на советские оценки – от двойки до трех с плюсом. Получившие более 80 баллов выделяются способностями и, как правило, подготовлены в спецшколе или репетиторами. Не лучше ситуация с физикой. В этом случае проблема обостряется дефицитом учителей, в педвузы на направление «учитель физики» недоборы, да и идут туда не с самыми высокими школьными баллами. В США в последние годы только на переподготовку учителей-естественников выделяется по 5 млрд. долларов в год.

Для преодоления блокирующих модернизацию образования в области STEM-факторов (*STEM – science, technology, engineering, and mathematics – естественные науки, технологии, инженерное дело, математика*) был принят Федеральный стратегический пятилетний план, призванный содействовать:

- привлечению большего количества студентов с целью подготовки по инженерным направлениям;
- повышению качества и эффективности обучения по STEM-дисциплинам;
- применению активных методов обучения;
- активизации интеграции вузов и производства.

В частности, планируется: рост числа обязательных курсов по математике и естественным наукам в школе, увеличение количества STEM-школ, содействие их сотрудничеству с вузами, предусматривается подготовка 100000 школьных учителей с высоким уровнем квалификации по STEM-дисциплинам к 2020 г., оказание всесторонней поддержки работающим в настоящее время учителям; значительно возрастет выпуск специалистов [8].

Если мы хотим обеспечить технологический прорыв, нужно поднять изучение физики и математики в школе на качественно иной уровень. В старших классах школы следует ввести жесткую сетку часов по математике, информатике и физике. По этим предметам (как это было раньше) утвердить жесткие учебные планы – какая тема, в какой четверти изучается. Мы уже столкнулись с тем, что формально «предмет закрывается», но многое из того, что требуется – не изучалось. В результате школьники при переходе из одной школы в другую некоторые разделы проходят по два раза, некоторые – не проходят вообще. Творчески работающих по собственным методикам учителей по стране менее 5%. В реальности нужно рассчитывать на учителей, просто педантично выполняющих свои обязанности. Конкурсы «Лучший учитель» – замечательный опыт, но по отчетности на «бумаге» в них принимает участие большая часть учителей, а реально – менее 5%. Целесообразно ввести обязательные ЕГЭ по информатике и физике для желающих поступать на технические специальности. Получить более высокие баллы по обществознанию легче, чем по информатике или физике, а поскольку школы весьма заинтересованы в высоких баллах своих выпускников, на школьников оказывается определенное давление, предлагаются для сдачи ЕГЭ более легкие предметы.

Если в средней школе можно что-то сделать без дополнительных финансовых затрат, то в высшей школе значительно больше проблем и решить их сложнее. Самые главные – подушевое финансирование и четырехлетний бакалавриат. Когда преподаватель поставлен в условия: либо он ставит положительную оценку, либо его сокращают из-за уменьшения числа студентов, оценка по математике может быть поставлена даже в том случае, если студент не знает таблицу умножения. Самый печальный результат – подобная практика понижает уровень подготовки хороших студентов. Полагаем, что возврат к финансированию по факту приема на первый курс несколько не увеличит финансовую нагрузку для страны. Отчисление за все годы обучения 30–35% неуспевающих студентов скажется на ухудшении отчетности некоторых департаментов Минобрнауки, но подготовка кадров в стране только улучшится – эти 30% все равно никогда не смогут работать по специальности, так как у них нет соответствующей квалификации, а другие 70% будут существенно лучше подготовлены.

Еще одна проблема – бакалавриат. В Советском Союзе была хорошая система инженерного образования – специалитет. Тогда был создан культ технического образования. В 2003 году было принято решение о переходе на систему «бакалавр – магистр», однако в странах, откуда мы перенимали этот опыт, 12-ти-летнее школьное обучение [9, 10]. И как бы не называть последние два года обучения – «secondary school», «high school» или как-то еще, но это два года обучения, причем по направлению выбранной в университете специальности. И реально четыре года обучения в университете (а на некоторых специальностях всего три года) – это 5 (иногда 6) лет обучения. Поэтому бакалавр 2 + 4 года обучения – это инженер в прежнем понимании квалификации, а бакалавр – 4 года обучения – это то, что раньше называлось незаконченным высшим образованием. Такие бакалавры промышленности не нужны. Обучение в магистратуре – подготовка инженера-исследователя – предполагает дополнительные затраты на обучение, без которого инженер-производственник и эксплуатационник вполне имел бы достаточный для производства уровень подготовки, а их нехватка не ощущалась бы так остро. Оговоримся, что есть направления, где выпускники-бакалавры с 4-х-летним сроком обучения могут быть

востребованы на рынке труда, но их число ограничено: речь идет об отдельных гуманитарных и некоторых «компьютерных» специальностях. Чтобы в ближайшем будущем не оказаться на обочине технического прогресса, более того, не столкнуться с угрозой национальной безопасности и утраты суверенитета, необходимо перейти на пятилетнее обучение в бакалавриате, сохранив двухлетнее – в магистратуре. Уровень магистра в этом случае также повысится. Это возможно без дополнительного финансирования высшей школы за счет маневра количества бюджетных студентов на разных специальностях. Уменьшение набора на некоторые специальности будет только полезным для страны и для выпускников, которые в противном случае потом не смогут найти работу.

Правительства весьма преуспевающих стран в полной мере осознают, что именно физико-математические науки служат основой научно-технического прогресса, и не спешат переходить к форсированной подготовке инженеров по ряду специальностей. Так, в Испании отсутствует бакалавриат по техническим и строительным специальностям, во Франции его нет по направлениям, ориентированным на выпуск специалистов для таких отраслей, как авиастроение, судостроение, энергетика, транспорт и пр. В Германии предусмотрены и выпуск бакалавров с 4-х-летней подготовкой, и подготовка специалистов в течение 5.5 лет по техническим специальностям [11].

Не менее острой проблемой для полноценной подготовки в техническом вузе стал либеральный подход к стандартизации образования, нашедший отражение в так называемых стандартах «три» и «три плюс». Впечатление такое, что их авторы хотели отчитаться за что-то новое, креативное, но смысл и польза трудноуловимы. Целесообразнее было бы в стандартах специальностей на младших курсах четко прописать, какие темы и по какой обязательной дисциплине необходимо изучать и какое количество зачетных единиц предусматривается. Представляется возможным отказаться от вариативных дисциплин на 1-ом и 2-ом курсах. В настоящее время обретение значительного количества компетенций, предусмотренных стандартами, возможно при прохождении школьной программы либо сокращенной вузовской. При существующей практике формально, в соответствии со стандартом, выпускник компетентен в той или иной области, но в реальности достаточных знаний нет.

Формирование полноценного, соответствующего требованиям времени кадрового потенциала научно-технического комплекса страны требует решения еще одного весьма значимого вопроса. Прежняя система подготовки и повышения уровня квалификации научных кадров предполагала прохождение следующих ступеней: специалист, кандидат наук, доктор наук. Если мы перешли на «Болонскую систему» в высшем образовании, то и в научной квалификации целесообразно введение степеней бакалавра, магистра, доктора (Ph.D.). Нишу молодого ученого и преподавателя занимает магистр. Уровень отечественного кандидата наук полностью совпадает с Ph.D., а ученая степень «доктор наук» может перейти в разряд почетных званий. Такой подход позволит заметно сэкономить средства, повысить эффективность научно-исследовательской деятельности, а также проще и качественнее организовать работу диссертационных советов.

Может и должен быть востребован советский опыт распределения выпускников из студентов-бюджетников, приобретения студентами-старшекурсниками практических навыков на промышленных предприятиях, целевой прием и т.д. Кроме Московского государственного индустриального университета, в России не осталось заводов-вузов, хотя

подобная система отлично зарекомендовала себя в Германии, где в нее включены более 30% технических вузов страны. В США программы кооперированного образования внедрены в трети университетов. Кадровый потенциал и ресурсы передовых промышленных предприятий неопределимы при подготовке инженеров-производственников [12].

Опыт Германии интересен и тем, что в этой стране активно используется научно-технический потенциал отдельных территорий, что весьма актуально для России, где есть крупные академические центры, наукограды. Отсутствие последовательной государственной научно-технической политики в РФ, предусматривающей, в том числе, и поддержку таких региональных центров, интеграцию науки, образования и производства, модернизацию высшего технического образования, привело к «утечке умов» и их перетоку в крупные зарубежные научные центры и университеты.

Наконец, в последние десятилетия просматривалась тенденция к изъятию из образования вопросов, касающихся социальных целей и общественных устремлений. Причины подобной прагматичной, технократической или антинациональной политики – тема отдельных исследований и острых дискуссий. Ее обоснованием явился принцип деидеологизации общественной жизни. Однако история уже доказывала неоднократно, что устранение идеологии вообще на деле означает отказ общества от собственного воспроизводства – и в его социальном, и в индивидуальном, человеческом аспекте, то есть фактически уничтожение социального менталитета, осмысленных критериев развития общества и невозможность его консолидации. Между тем, без этого невозможна модернизация. Историческая логика классической модернизации: модернизация сознания – модернизация бытия – модернизация институтов – модернизация экономики – модернизация идентичности, что доказал и зарубежный, и отечественный опыт ее осуществления. Стране нужны всесторонне развитые, творчески и критически мыслящие специалисты, способные к генерации идей, стратегическому анализу, умеющие обосновывать и отстаивать свою гражданскую позицию. Обучить и воспитать специалиста и патриота можно, лишь сохраняя здоровый консерватизм, опирающийся на богатый опыт отечественной педагогики, на традиции нравственности, которые веками вырабатывались в народе. Потому преподавание гуманитарных дисциплин предполагает единство учебно-воспитательного процесса. Формирование нравственных ориентиров в разрешении глобальных проблем современности должно способствовать пониманию социокультурных смыслов техники и инженерии, преодолению технократического мышления, порождающего дефицит культуры мысли, элементарной грамотности, общения, творческих индивидуальностей. По свидетельству экспертов западных университетов, в результате изучения гуманитарных дисциплин активизируется не только логическое, но и интуитивное, творческое начало человека, расширяется сфера эстетического отношения к миру, осуществляется гармонизация личности.

Таким образом, мы полагаем, что перманентные, непоследовательные, не учитывающие российской реальности и исторического опыта реорганизации в системе высшего технического образования обеспечивают лишь социальное напряжение, «утечку умов», рост пессимизма, но не столь необходимую модернизацию инженерного и среднетехнического образования. Исследователи совершенно справедливо утверждают, что базовые принципы высшего технического образования изменились незначительно, а выпускники, зачастую, не обладают знаниями на уровне новейших достижений техники и технологий,

а также практическим опытом участия в исследованиях в процессе обучения, не владеют теорией экономики, маркетинга, менеджмента, не обладают достаточным уровнем знания иностранного языка, не вполне удовлетворяют работодателей личностные качества молодых специалистов; фактически не действует система регулярной переподготовки, в которой особо остро нуждаются специалисты в области техники и технологий, так как знания устаревают очень быстро [13].

Нам близка позиция авторов [14], которые убеждены, что именно научно-техническая интеллигенция – какой она должна быть – могла бы выступать связующим звеном между наукой, техникой и культурой, способствуя не противоречащему социально-культурному, духовному развитию человека и общества прогрессу науки, техники и технологии, соответствию их развития условиям функционирования современной культуры, ее ценностям, идеалам и традициям. Таким образом, научно-техническая интеллигенция могла бы обеспечивать преодоление технократического мышления в научно-технической сфере, устранять противоречия между технической и гуманитарной культурой, предотвращать угрозу экологической и техногенной катастроф.

Уверены, что воспроизводство кадрового потенциала научно-технического комплекса страны – одно из важнейших стратегических направлений, так как специалисты в области техники и технологии обладают способностью одновременно генерировать идеи, обеспечивать их практическое воплощение и дальнейшее продвижение, быстро адаптироваться к меняющимся запросам производства и экономики. Полагаем бесспорным вывод о том, что подготовка высококвалифицированных специалистов, которых в полной мере возможно было бы отнести к новому поколению российской научно-технической интеллигенции, с ее лучшими традициями, любовью к стране и стремлением работать и творить во имя ее процветания, является одним из важнейших факторов преодоления кризиса, укрепления необходимого уровня национальной безопасности, обеспечения модернизационного рывка. Мы поддерживаем тех представителей научно-педагогического сообщества, которые убеждены, что решение этой общенациональной проблемы невозможно без возрождения инновационной триады, обеспечивающей создание сложных технических систем: наука, промышленно-ориентированный сектор экономики, система инженерного образования.

Литература:

1. Велихов Е.П., Бетелин В.Б., Кушнirenко А.Г. Промышленность, инновации, образование и наука в России. М.: Наука, 2010. С. 5.
2. Бодрова Е.В., Гусарова М.Н., Калинов В.В. Эволюция государственной промышленной политики в СССР и Российской Федерации / под общ. ред. Е.В. Бодровой. М.: ООО «НИПКЦ Восход-А», 2013. С. 194.
3. Велихов Е.П., Бетелин В.Б., Кушнirenко А.Г. Промышленность, инновации, образование и наука в России. М.: Наука, 2010. С. 11.
4. Послание Президента Федеральному Собранию от 4 декабря 2014 года. Электронный ресурс. URL: <http://kremlin.ru/news/47173> (дата обращения: 19.01.2015).
5. Под председательством Владимира Путина в Кремле состоялось заседание Совета при Президенте по науке и образованию. Электронный ресурс. URL: <http://www.>

kremlin.ru/news/45962 (дата обращения: 24.06.2014).

6. В Астрахани прошло заседание комиссии по вопросам стратегии развития ТЭК. [Электронный ресурс] // URL: <http://utimenews.org/ru/page/100722> (дата обращения: 06.06.2014).

7. Rogozin D.A. Сейчас знания становятся оружием не менее мощным, чем ракеты и пушки // Российская газета. 2014. № 6343 (71).

8. Медникова Т.Б., Сенашенко В.С. Инженерное образование в США // Высшее образование в России. 2014. № 12. С. 119–127.

9. Угапьев И.Н. Школьное образование в США // Вестник научных конференций. 2015. № 3-2(3). С. 154–155.

10. Агрыскина Е.И., Васильев А.А. Особенности систем образования в России и европейских странах // Электронный научный журнал «Информационно-коммуникационные технологии в педагогическом образовании». 2015. № 2(35). <http://journal.kuzspa.ru>

11. Соловьев В.П., Крупин Ю.А., Перескокова Т.А. Использование модели профессиональной среды для подготовки инженеров // Высшее образование сегодня. 2015. № 3. С. 9–14.

12. Зубарев Ю.М. Инновационные направления деятельности высших учебных заведений по подготовке специалистов для машиностроительного комплекса России // Высшее образование сегодня. 2015. № 2. С. 15–18.

13. Калинов В.В. Государственная научно-техническая политика СССР и Российской Федерации (1985–2011 гг.): автореф. дис. ... д-ра истор. наук. М., 2012. С. 3.

14. Золотухина А.В. Научно-техническая интеллигенция и ее социокультурная роль в информационно-технологическом обществе России: дис. ... канд. философ. наук. Уфа, 2004. 146 с.

УДК: 330.35

ВЛИЯНИЕ МЕЖДУНАРОДНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
РАЗДЕЛЕНИЯ ТРУДА НА ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ
И ПРОМЫШЛЕННУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ

С.М. Сухорукова^{@,1}, д.э.н. профессор

А.М. Погорелый¹, к.т.н., доцент

А.В. Самороков², к.э.н., доцент

¹Кафедра экологической и промышленной безопасности,
Московский технологический университет (Институт тонких химических технологий),
Москва, 119571 Россия

²Кафедра экономической теории,
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,
Москва, 125047 Россия

@Автор для переписки, e-mail: Sukhorukova@inbox.ru

Существующее в настоящее время международное разделение труда, как правило, не учитывает природно-климатической специфики территории и социально-культурных особенностей природопользования местного населения. Возможность такого разделения труда в рамках теории либеральной экономики доказывается концепцией «сравнительных издержек», согласно которой роль каждой страны в международном разделении труда должна определяться ее возможностью производить продукт с меньшими, чем в других странах, экономическими издержками. Эта концепция не позволяет организовать экологически безопасное использование ресурсов биосферы как целостного природного организма, что ведет к росту экологических проблем, причем не только в тех странах, которым отведен статус экологических колоний. Принимая во внимание, что в условиях глобализации экономики существует взаимозависимость стран в сфере экологической и промышленной безопасности, авторы статьи предлагают в международной инвестиционной политике использовать институт «природного суверенитета». В рамках предлагаемого института каждое государство должно строить политику природопользования с учетом эколого-экономических интересов своего населения и тех общебиосферных лимитов, которые гарантируют жизнепригодность биосферы для мирового сообщества в целом. Институт «природного суверенитета», по мнению авторов, послужит основанием для формирования ответственности каждого государства за экологически безопасное развитие не только своей страны, но и всего мирового сообщества. В то же время принятие указанной концепции потребует формирования мировоззрения, разделяющего убеждение, что биосфера существует в системе природных общепланетарных зависимостей, нарушение которых ведет к уничтожению ее жизнепригодности и гибели цивилизации.

Ключевые слова: глобализация, международное разделение труда, экологическая безопасность, промышленная безопасность.

EFFECT OF INTERNATIONAL TECHNOLOGICAL DIFFERENTIATION OF LABOUR ON ECOLOGICAL AND INDUSTRIAL SAFETY

S.M. Sukhorukova[@],
A.M. Pogorelyi,
A.V. Samorokov

*Moscow Technological University (Institute of Fine Chemical Technologies),
Moscow, 119571, Russia*

[@]Corresponding author e-mail: Sukhorukova@inbox.ru

At present, an international division of labor, as a rule, does not take into account neither the climatic specifics of the territory nor socio-cultural characteristics of natural resources of the local population. The possibility of such a division of labor within the framework of liberal theory of economics is proved by the concept of "comparative costs", according to which the role of each country in the international division of labor should be determined by its ability to produce a product with economic costs that are less than in other countries. This concept does not allow to organize environmentally friendly use of resources of the biosphere as a holistic natural body, what leads to an increase in environmental problems, not only in those countries, which are diverted with the status of the environmental colonies. Taking into consideration that, in a globalized economy, there exists the interdependence of countries in the field of environmental and industrial safety, the authors propose to use the institution of "natural sovereignty" in an international investment policy. Within the framework of the proposed institute, each state should build a policy of natural resources, taking into account both ecological and economic interests of its people and those general biosphere limits that guarantee the liveability of the biosphere for the world community as a whole. The institution of "natural sovereignty", according to the authors, will serve as the basis for the formation of the responsibility of each state for the environmentally safe development of both its country and the entire world community. At the same time, the adoption of this concept will require the formation of outlook sharing the conviction that the biosphere exists in the system of natural planetary dependencies, the breach of which leads to the destruction of its livability and the death of civilization.

Keywords: globalization, international division of labor, environmental safety, industrial safety.

Об экологическом самоуничтожении, угрожающем промышленной цивилизации, говорится на протяжении всех последних десятилетий [1, с. 11–124]. За это время были проведены многочисленные международные конференции, итогом которых стало принятие различных природоохранных программ, но глобальные экологические проблемы растут. В частности, обеспокоенность вызывает потепление климата. Этой проблеме посвящена Международная климатическая конференция в Париже в 2015 г., на которой было предложено для снятия антропогенного фактора дестабилизации климата сократить выброс парниковых газов посредством перехода с углеводородного топлива на альтернативные источники энергии [2]. Однако радикальное решение экологической проблемы

таким путем не достигается, т.к. она связана со способом природопользования, основанным на антропоцентристском мировоззрении промышленной цивилизации. Глубинные причины экологических проблем на Парижской конференции не обсуждались, что, как нам представляется, согласуется с экономическими интересами Транснациональных корпораций (ТНК) так называемых «развитых» стран. Они не соответствуют задачам сохранения жизнепригодной биосферы, хотя, порождая негативные социальные и эколого-экономические ситуации во всех странах мирового сообщества, ведут к сокращению возможности экономического роста и для самих ТНК.

Свои взгляды на взаимосвязь экономического роста и сохранения жизнепригодности биосферы мы ранее изложили в статье [3]. В ней отмечается необходимость использования биосферы как единой среды обитания, что требует создания общепланетарных природоохранных институтов. За прошедшие полвека глобализации уже накоплен опыт формирования наднациональных структур, интеграционных объединений, которые можно было бы использовать для решения общепланетарных природоохранных задач. Реализации сложившихся институциональных возможностей не способствует международное «технологическое разделение труда», в котором заинтересованы ТНК промышленно развитых стран.

Международное «технологическое разделение труда» начало формироваться в конце XX века, когда с использованием достижений научно-технической революции стали расти масштабы промышленного производства и «развитым странам» требовались все бóльшие объемы природных ресурсов. К 1970-м годам поставщики сырья освободились от колониальной зависимости. Став независимыми государствами, они взяли под контроль поставки своих ресурсов, при этомкратно увеличив цены на природное сырье. В «развитых» странах разразился сырьевой кризис. Проведенная технологическая реиндустриализация позволила «развитым» странам сократить природоемкость своей промышленной продукции, но на глобальном уровне дефицит природных ресурсов нарастал. Тогда «развитые» страны вступили на путь создания международного «технологического разделения труда», которое позволило им оставить при себе наукоемкую часть технологической цепочки промышленного производства, а ее природоемкую часть перевести в страны, располагающие природными ресурсами, но отстающие в технологическом развитии. В рамках теории либеральной рыночной экономики такое разделение труда доказывается концепцией «сравнительных издержек», согласно которой роль страны в международном разделении труда определяется наличием возможности производить продукт с издержками меньшими, чем другие страны. Данная концепция не позволяет организовать экологически безопасное использование ресурсов биосферы как целостного природного организма. Либеральная основа глобализации запрещает политику протекционизма для стран, принимающих экологически опасное и природоемкое производство на свою территорию.

В результате международного «технологического разделения труда» ТНК получили возможность влиять на экономику стран, располагающих необходимыми для них природными ресурсами, таким образом, что она стала служить интересам «развитых» стран. В качестве примера можно привести опыт встраивания экономики Российской Федерации в систему глобального мира после либеральных реформ 1990-х годов. Всего за несколько лет в нашей стране была уничтожена перерабатывающая промышленность в

своей наукоемкой части и начался рост «сырьевых» отраслей (газо- и нефтедобывающих, в частности), а также производств, отличающихся высокой энерго- и водоемкостью и токсичными выбросами [4]. Подобная ситуация сохраняется до настоящего времени. Как показал состоявшийся в Петербурге (2016 год) Экономический форум, иностранные инвесторы по-прежнему предпочитают вкладывать деньги в добычу наших ресурсов и природоемкие производства [5].

Получившие в «чужих» странах доступ к природным ресурсам ТНК наращивают их добычу, что ведет к росту локальных эколого-экономических проблем. Тем не менее, прибыли ТНК растут, поскольку погашение эколого-экономических издержек производства осуществляется бюджетами экологических колоний. Это создает для ТНК видимость экономического роста, но в перспективе он может быть сведен к нулю, т.к. сложившееся международное «технологическое разделение труда», создавая локальное природоистощающее производство, нарушает целостность всей биосферы и, в конечном счете, приводит к росту глобальных издержек эколого-экономического характера.

Еще в прошлом веке В.И. Вернадский доказал, что биосфера – единый биогеохимический организм, и для безопасного хозяйственного его использования необходимо учитывать природные закономерности сохранения целостности биосферы [6]. Последователи теории В.И. Вернадского продолжают доказывать, что экологическая опасность промышленного природопользования в отдельной стране влияет на экологическую и промышленную безопасность всех остальных стран, ибо атмосфера и водные ресурсы планеты не признают государственных границ:



В настоящее время такая взаимозависимость не учитывается, и экологически опасное международное «технологическое разделение труда» сохраняется. Этому способствует и то, что «развитые» страны многолетней политикой переманивания специалистов из других стран сохраняют лидерство в сфере технико-технологических инноваций, консультируя таким образом технологическое отставание тех стран, которые представляют для них интерес своими запасами ресурсов (углеводородов, руды, пресной воды и т.д.). При этом сторонники международного «технологического разделения труда» продолжают настаивать на том, что оно будто бы способствует распространению технологических достижений, которыми ранее располагали только «развитые» страны, и при этом, как они считают, передача технологических достижений помогает менее развитым странам поднять занятость среди местного населения и, следовательно, уровень его благосостояния. Однако, проблема бедности в этих странах не снята, но наблюдается рост не только экономических и экологических, но и сопряженных с ними социо-культурных проблем [7, с. 28–40, 73–81].

Не стоит забывать, что политика по встраиванию государств в единую технологическую цепочку (от добычи ресурсов до выхода наукоемкой продукции и ее реализации) требует унификации не только технологических нормативов, но и социо-экономических отношений. Их либеральная основа не всегда соответствует системе ценностей населения в экологических колониях, его традициям, сложившимся на протяжении предыдущих тысячелетий. В результате растут конфликты, доходящие до вооруженных столкновений. На это «развитые» страны отвечают ростом военно-промышленного комплекса, что также ложится бременем на биосферу.

В то же время в последние два десятилетия «развитые» страны принимают программы перехода к «зеленой» экономике, согласно которым увеличение экономических благ не должно сопровождаться сокращением благ экологических. Для определения результативности этих программ во Всемирном банке разработан показатель «скорректированные накопления», в котором ВВП соотносится с динамикой истощения природных ресурсов и загрязнения природной среды. Если указанный показатель в «развитых» странах будет учитывать экологическую ситуацию тех стран, куда ими переведены природоемкие и «грязные» технологические стадии промышленного производства, то можно будет выйти на такое экологически безопасное использование биосферы, которое сохранит ее жизнепригодность.

Жизнепригодность биосферы должна поддерживаться всеми субъектами хозяйствования, ее сохранение требует участия всех и каждого. Соединение глобального и личного возможно лишь при условии связи человека с природой на территории его проживания. Природные условия каждой территории обуславливают свой ритм хозяйствования, размер энергетического восполнения затрат труда, а, следовательно, особенности еды, тип одежды, жилья. У каждого народа свой характер природопользования, ибо на его содержание не могут не влиять климат, характер ландшафта (горного или равнинного), близость к морскому побережью, наличие или отсутствие пресной воды и т.п. Народонаселение всегда стремилось к стабильности жизнеобеспечения, на это их ориентировали образ жизни, традиции, праздничные ритуалы и т.д. В результате складывалась та система «общество–природа», в которой в качестве важнейшего фактора выступала и экологическая нравственность. Она воспитывала у народа ответственность за сохранение природы на их территории, а говоря современным языком – локальной экосистемы. И в доиндустриальный период именно многообразие культур выступало гарантом сохранения биосферы как системы множества локальных экосистем.

Международное «технологическое разделение труда» ломает многообразие культур. Навязываемый либерально-рыночный способ природопользования выпадает из традиционно-культурного контекста местного населения, чему служит и образование новых поколений. В образовательных программах подготовки специалистов в странах, подписавших Болонский протокол, исключен социо-культурный аспект с привязкой к истории своей страны¹.

Как вернуть народам возможность построить способ жизнеобеспечения, сохраняя свою культуру, при этом не отказываясь от научно-технических достижений цивилизации, не выпадая из русла ее технологического развития? Авторы данной статьи предлага-

¹Начиная с 1990-х годов, этот процесс не миновал высшую школу России.

ют при организации международного разделения труда опираться на институт «природного суверенитета», согласно которому каждое государство должно иметь возможность строить политику природопользования с учетом природы, культуры и экономических интересов своего населения, а также тех лимитов, которые гарантируют жизнеспособность биосферы в целом. Предложенный институт, по мнению авторов, послужит основанием для формирования ответственности государства за экологически безопасное развитие не только своей страны, но и всего мирового сообщества. Ибо на кого сегодня возлагать ответственность за глобальные экологические проблемы? Вопрос не праздный. Это продемонстрировала вышеупомянутая конференция по климату в Париже, где две недели представители 197 стран вели дискуссию, в результате которой «развитым» странам удалось перевести ответственность за потепление климата на развивающиеся страны, где действительно наблюдается рост выбросов парниковых газов. Действительно, на их территориях, при сложившемся международном «технологическом разделении труда», оказались самые «грязные» и природоёмкие стадии промышленного производства. На конференции было решено, что «развитые» страны перечислят развивающимся странам денежные средства, полагая, что таким образом ими обеспечивается всеобщее экологически устойчивое развитие [8]. Сохраняющаяся при этом глобальная экологическая опасность, а также рост социальной напряженности и культурной деградации населения в развивающихся странах не учитывается.

В заключение можно сказать следующее. Промышленная цивилизация исчерпала возможности развития, основанного на такой эксплуатации природных ресурсов биосферы, которая угрожает разрушением локальных экосистем, являющихся элементами системной целостности биосферы. Для обеспечения экологической безопасности мировому сообществу необходим переход к международному разделению труда, которое сможет обеспечить для человечества сохранение его природной среды. Предлагаемый авторами институт «природного суверенитета» обяжет учитывать в инвестиционной политике природную специфику территории и социо-культурные особенности природопользования местного населения. Однако принятие института «природного суверенитета» потребует мировоззрения, согласно которому при использовании ресурсов биосферы необходимо учитывать, что она существует в системе жестких общепланетарных зависимостей, нарушение которых ведет к уничтожению жизнеспособности биосферы и гибели цивилизации.

Литература:

1. Доклад о человеческом развитии 2014. Обеспечение устойчивого прогресса человечества: уменьшение уязвимости и формирование жизнестойкости: пер с англ. М.: Изд-во «Весь Мир», 2014. 236 с.
2. Adoption of the Paris agreement. Conference of the Parties Twenty-first session Paris, December 2015. United Nations : FCCC/ CP/ 2015/ L. 9/ Rev.1: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>
3. Сухорукова С.М., Погорелый А.М., Самороков А.В. Жизнеспособность биосферы и теория экономического роста // Вестник МИТХТ. Серия: социально-гуманитарные науки и экология. 2014. Т. 1. № 3. С. 68–73.

4. Белая книга. Экономические реформы в России 1991-2001. М.: Алгоритм, 2002. 432 с.
5. XX Петербургский международный экономический форум (ПМЭФ). Июнь, 2016. www.forumspb.com
6. Вклад В.И. Вернадского в развитие мировой цивилизации (к 150-летию со дня рождения): сборник. М.: Неправительств. экол. фонд им. В.И. Вернадского, 2013. 220 с.
7. Экологический менеджмент в условиях глобализации экономики. М.: КолосС, 2009. 216 с.
8. http://cc.voeikovmgo.ru/images/sobytiya/2015/12/Paris_Agreement_109r_RUS.pdf.