

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 2 (505)

2010

ДЕПАРТАМЕНТ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1 **СВЧ-ТЕХНИКА**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск	2(505)
		-

2010

Издается с 1950 г.

Главный редактор д.т.н. **А.Н. Королев**

Редакционная коллегия:

к.т.н. С.А. Зайцев (зам. главного редактора), д.т.н. **Б.Н. Авдонин** (зам. главного редактора, ОАО ШНИИ «Электроника»), к.т.н. В.Н. Батыгин, Ю.А. Будзинский, к.ф.-м.н. А.В. Галдецкий, Б.Ф. Горбик, С.И. Гришин, д.ф.-м.н. Б.Ч. Дюбуа, д.т.н. С.С. Зырин, к.т.н. Ю.А. Кондрашенков, к.т.н. А.С. Котов, к.т.н. Е.А. Котюргин, д.т.н. П.В. Куприянов, к.т.н. В.В. Лисс, д.т.н. М.И. Лопин, В.М. Малыщик, В.А. Мальцев, к.т.н. П.М. Мелешкевич, д.ф.-м.н. А.Б. Пашковский, Е.Н. Покровский, к.т.н. А.В. Потапов, к.т.н. С.Е. Рожков, д.т.н. К.Г. Симонов, В.П. Стебунов (ответственный секретарь), к.т.н. А.М. Темнов, д.т.н. Н.Д. Урсуляк, д.т.н. М.М. Трифонов (ЗАО НПП «Исток-Система»), **О.А. Морозов** (ЗАО «НПП «Магратеп»), к.т.н. А.Г. Михальченков (МУП «ДПРН Фрязино»), д.ф.-м.н. А.И. Панас (ИРЭ РАН), к.т.н. В.В. Абрамов (ФГУП СКБ ИРЭ РАН), А.А. Туркевич (ФГУП «НПП «Циклон-Тест»)

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук)

© Федеральное государственное унитарное предприятие «НПП «Исток», 2010 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Выпуск 2(505)	2010
Электровакуумные приборы	
<i>Петроченков В.И.</i> – Оптимизация характеристик магнетрона	3
Твердотельная электроника	
Воробьев А.А., Воробьева Е.В., Галдецкий А.В., Духновский М.П., Ратникова А.К., Федоров Ю.Ю. – Моделирование теплового режима полупроводниковых приборов с различными типами теплоотводов	12
Иовдальский В.А., Ганюшкина Н.В., Чепурных И.П. – Простой инженерный метод рас- чета дополнительного теплоотвода в ГИС СВЧ	21
Темнов А.М., Дудинов К.В., Красник В.А., Богданов Ю.М., Крутов А.В., Лапин В.Г., Щербаков С.В. – Комплект широкополосных СВЧ-микросхем на гетероструктурах А ^{тв} Для ППМ АФАР Х-диапазона	30
Технология	
Бабуров В.А., Земляков В.Е., Красник В.А. – Плазмохимическое осаждение нитрида кремния с заданными электрическими свойствами для СВЧ-конденсаторов	50
Медицинская электроника	

Казаринов К.Д., Полников И.Г. – Изучение биологических эффектов микроволнового	
излучения с помощью хемилюминесцентного метода	57

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Published by Federal State Unitary Enterprise "RPC "Istok" The Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation (MINPROMTORG) Radioelectronic Industry Department

CONTENTS

|--|

Electrovacuum devices

Petrochenkov V.I. – Magnetron characteristics optimization	3
Solid-state electronics	
Vorobyov A.A., Vorobyova E.V., Galdetsky A.V., Dukhnovsky M.P., Ratnikova A.K., Fyodo- rov Yu.Yu. – Modeling of heat mode for semiconductor devices with different types of heat sinks	12
<i>Iovdalsky V.A., Ganyushkina N.V., Chepurnyh I.P.</i> – A simple engineering method of calculating an extra heat sink in microwave HICs	21
<i>Temnov A.M., Dudinov K.V., Krasnik V.A., Bogdanov Yu.M., Krutov A.V., Lapin V.G., Scherbakov S.V.</i> – A set of wideband MMICs on A ^{III} B ^V heterostructures for <i>X</i> -range <i>R</i> / <i>T</i> active phased array modules	30
Technology	
<i>Baburov V.A., Zemlyakov V.E., Krasnik V.A.</i> – Silicon-nitride plasma chemical deposition with preset electric properties for microwave capacitors	50
Medical electronics	
<i>Kazarinov K.D., Polnikov I.G.</i> – The study of biological effects of microwave radiation using hemiluminescent method	57

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.6

ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНЕТРОНА

В. И. Петроченков

ЗАО «НПП «Магратеп», г. Фрязино

Рассмотрены направления оптимизации мощного магнетрона для достижения высокого КПД при умеренном анодном напряжении. Оптимизация проводилась путём вариации основных параметров магнетрона с последующим анализом результатов расчётов. В качестве базовых ориентиров использовались результаты, достигнутые на ранее разработанных приборах. При сохранении удельных нагрузок, градиентов статических и переменных СВЧ-полей эти ориентиры могут быть распространены на близкие диапазоны частот и уровни мощности с прежней степенью достоверности. Показана возможность создания магнетрона в дециметровом диапазоне длин волн с выходной импульсной мощностью 50...100 МВт и КПД до 80 % при анодном напряжении не более 65...75 кВ.

Ways of optimization power magnetron for achievement of high efficiency are considered at a moderate anode voltage. Optimization was carried out by a variation of basic magnetron parameters with the subsequent analysis of results of calculations. As base reference points the results achieved on earlier developed devices were used. At preservation of specific loadings, intensity of static and RF fields these reference points can be distributed on close ranges of frequencies and levels of capacity with a former degree of reliability.

The opportunity of magnetron creation at a decimeter range of wave lengths with target pulse power power 50...100 MW and efficiency up to 80 % is shown at an anode voltage no more than 65...75 kV.

КС: магнетрон, модель, оптимизация

Keywords: magnetron, model, optimization

1. ВВЕДЕНИЕ

Во многих областях применения магнетрон является относительно дешёвым и эффективным источником СВЧ-энергии. Количество разработанных отечественных магнетронов достигло своего апогея в семидесятые годы прошлого столетия, когда производились приборы в диапазонах длин волн от долей миллиметра до метров с уровнями выходных мощностей, приблизительно согласующимися с известным соотношением

$$P_{\mu} f_0^2 = \text{const},\tag{1}$$

где f_0 – рабочая частота; $P_{_{\rm H}}$ – выходная мощность (в нагрузке).

Степень соответствия определяется конструкцией прибора, технологией изготовления и принятыми запасами между рабочим и предельным режимами для обеспечения заданных на-

дёжности и долговечности. В частности, были созданы отечественные приборы 10-см диапазона с импульсными выходными мощностями 30...50 МВт при анодном напряжении около 50 кВ, скважностью 1000, длительностью импульсов до 10 мкс. В основном это достигнуто увеличением примерно на порядок площади пространства взаимодействия по сравнению с классическими конструкциями.

В настоящее время следует ожидать возобновления интереса к магнетронам и другим приборам М-типа (как импульсным, так и непрерывным) в связи с потребностями новой техники и развитием инновационных технологий широкого применения.

Основным средством разработки любого изделия, и особенно в области мощной вакуумной CBЧ-электроники, является трудоёмкий процесс макетирования. В связи с этим по-прежнему актуально снижение затрат на оптимизацию конструкции и технологии производства приборов. Наиболее простой путь, уменьшающий требуемое число макетов, – математическое моделирование, например, предложенное в работе [1]. Сравнение расчётных характеристик, найденных с помощью аналитической модели, с экспериментальными данными магнетронов многих типов показало их хорошее соответствие. Оптимизация проводилась путём вариации основных параметров магнетрона с последующим анализом конечных показателей расчётов. В качестве базовых ориентиров использовались результаты, достигнутые на ранее разработанных приборах. При сохранении удельных нагрузок, градиентов статических и переменных CBЧ-полей эти ориентиры могут быть распространены на близкие диапазоны частот и уровни мощности с прежней степенью достоверности.

Обычно при разработке нового прибора задаются выходная мощность $P_{_{\rm H}}$ (здесь и в дальнейшем сохранены условные обозначения физических величин, принятые в работе [1]), анодное напряжение $U_{_{\rm a}}$ и частота $f_{_0}$. Поскольку для нас целью оптимизации является достижение высокого уровня мощности и КПД, целесообразно ограничить рамки поиска. Для этого выбираем анодное напряжение не выше 55...75 кВ и частоту не ниже 915 МГц. Воспользовавшись соотношением (1), при необходимости можно «пересчитать» конструкцию в близкий диапазон частот, поскольку математическая модель [1] при «масштабном копировании» прибора следует соотношению (1). Например, при пересчёте на другую частоту с сохранением $P_{_{\rm H}}$, $U_{_{\rm a}}$ и относительной величины магнитного поля $\omega_{_{\rm u}}/\omega_{_0}$ удельные нагрузки на электродах изменяются в соответствии с формулой (1). Здесь $\omega_{_0} = 2\pi f_0^-$ круговая рабочая частота, $\omega_{_{\rm u}} = \eta B_0 -$ циклотронная частота, B_0 – рабочее магнитное поле, $\eta = e/m$ – отношение заряда электрона *e* к его массе *m*.

С целью оптимизации магнетрона варьируются следующие параметры:

– число ламелей N, которое для развитых в осевом направлении замедляющих систем может не совпадать с числом резонаторов K (рабочий вид колебаний в таком случае принято обозначать как π_0 , к нему приближаются по частоте продольные виды колебаний π_1 , π_2 ... π_k);

- высота пространства взаимодействия h_a;

– радиусы анода r_a и катода r_κ или относительный размер пространства взаимодействия q:

$$q = n \ln(r_a/r_w)/\pi; \tag{2}$$

– нагруженная $Q_{\rm H}$, собственная $Q_{\rm 0}$ и внешняя $Q_{\rm BH}$ добротности;

– волновое сопротивление замедляющей системы ρ_с или проводимость нагрузки G_μ:

$$G_{\mu} = 1/(Q_{\mu}\rho_{c}); \tag{3}$$

– магнитное поле B_0 ;

– анодное напряжение U_a .

Расчёт ведётся в предположении, что прибор имеет идеальный катод, способный обеспечить необходимую эмиссию во всей области генерации. Если для катода известны зависимость коэффициента вторичной эмиссии σ от напряжения обратной бомбардировки U_{o6} и ток термо-эмиссии I_{T9} при рабочей температуре, то модель позволяет оценить максимальный анодный ток (ток срыва) для различных режимов работы прибора.

В реальном приборе с большой долей термоэмиссии при приближении к току срыва может наблюдаться постепенный рост дифференциального сопротивления, затем «хвост» вольтамперной характеристики (ВАХ) резко «задирается» вверх. Эти явления данной моделью, опирающейся на концепцию ограничения анодного тока пространственным зарядом, не описываются.

Вопросы подавления конкурирующих видов колебаний, расчета вывода СВЧ-энергии, стабилизации частоты колебаний и другие задачи, являющиеся в значительной мере самостоятельными и обширными, здесь не рассматриваются.

2. ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА РЕЗОНАТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНЕТРОНА

Анализ магнетронов с различным числом резонаторов показателен, если его начать со сравнения приборов, имеющих одинаковые «холодные» характеристики и напряжение Хартри. Здесь пока не акцентируется вопрос о развитии пространства взаимодействия в осевом направлении, поэтому используется привычное для классических магнетронов (с относительным размером $h_a/\lambda_0 \cong 0.25$) отождествление числа резонаторов и числа ламелей. При этом принимается, что анодные напряжения одинаковы. Это достигается выбором напряжения Хартри $U_x = 50$ кВ, относительных магнитных полей $\omega_u/\omega_0 = 4$, соответствующих радиусов анода r_a и катода r_k при q=1, высоты пространства взаимодействия $h_a/\lambda_0 = 0.55$.

Абсолютные величины радиусов анода и катода при таких условиях однозначно определены и находятся из известных соотношений для напряжения Хартри.

Далее предполагается использование высокотемпературного окисно-иттриевого катода как оптимального для мощных приборов, благодаря его стойкости к повышенным удельным нагрузкам, хотя по эмиссионной способности он намного уступает оксидному катоду. Зато стоек к отравлению и перенапылениям оксида с замедляющей системы, приводящим к возникновению вторично-электронных разрядов и пробоев анод – катод.

Из рис. 1 видна степень различия КПД. Эффективность прибора с *N* = 20 достигает максимума (75...79 %) при



мощности 5...15 МВт, а для магнетрона с N = 6 она простирается от 15 до 60 МВт и составляет 65...69 %.

Казалось бы, что прибор с N = 6 выгодно использовать для получения больших мощностей. Однако дальнейший анализ показывает, что ему присущи большие удельные нагрузки и существенные катодные ограничения.

Более глубокое сравнение этих приборов, учитывающее бомбардировку катода, представлено на рис. 2 и 3.



Рис. 2. Анодный ток (1) и ток срыва (2) в зависимости от напряжения бомбардировки катода для магнетрона с N = 20



Рис. 3. Анодный ток (1) и ток срыва (2) в зависимости от напряжения бомбардировки катода для магнетрона с N = 6

Под током срыва I_{\max} понимается величина тока анода, выше которой в электронном облаке нарушается равновесие между уходом электронов на анод и их восполнением за счёт эмиссии. Зависимости токов срыва от энергии бомбардирующих катод электронов U_{00} , представленные на рис. 2-3, рассчитаны в соответствии с выражением:

$$I_{\max}(U_{o\delta}) = [\sigma_{a\phi\phi}(U_{o\delta}) - 1]I_{o\delta} + I_{Ta}, \qquad (4)$$

где $\sigma_{_{9\phi\phi}}(U_{_{0\delta}})$ – эффективный коэффициент вторичной эмиссии; $U_{_{0\delta}}$ – потенциал обратной бомбардировки катода; $I_{_{0\delta}}$ – ток обратной бомбардировки катода [1]; $I_{_{T9}}$ – ток термоэмиссии.

Ток срыва магнетрона определяется как точка пересечения зависимостей $I_{max}(U_{ob})$ и $I_{a}(U_{ob})$.

Ток срыва I_{max} в магнетроне с N = 20 составляет 1460 А, что соответствует мощности 54 МВт (рис. 2). В то же время для магнетрона с N = 6 $I_{\text{max}} = 435$ А, а выходная мощность при этом составит всего 16 МВт (рис. 3).

Реальный магнетрон возбуждается, если в пространстве взаимодействия имеется достаточное количество «затравочных» электронов. Для их интенсивного размножения начальная амплитуда бомбардировки U_{of} должна превосходить величину первого критического потенциала катода. Эти условия выполняются при наличии термоэмиссии, достаточной для создания электронного облака с бриллюэновской плотностью пространственного заряда. Окисно-иттриевый катод при температуре 1400...1500 °С способен обеспечить ток термоэмиссии 1 А/см². Как показывает опыт, этого достаточно для стабильного возбуждения мощного магнетрона.

В табл. 1, 2 приведены выходные характеристики вариантов с числом резонаторов N = 20 и N = 6. В верхней строке таблиц приводятся предельные данные для тока срыва, а ниже – для выходной мощности P_{μ} , которая на 25 % меньше предельной.

Магнетрон с N = 20

Таблица 1

<i>Р</i> _н , МВт	I _a , A	U _а , кВ	КПД, %	P _a , MBт	<i>Р</i> к, МВт	<i>р</i> а, кВт/см ²	$p_{\kappa},$ к B т/см 2	U _{об} , кВ
68	1900	60	57	45	2,3	100	5,1	2,1
51	1360	59	63	25	1,7	5,7	3,8	1,9

Таблица 2

Магнетрон с N = 6

Р _н ,	I _a ,	$U_{\rm a}$,	КПД,	$P_{\rm a}$,	Р _к ,	p_{a} ,	p_{κ} ,	<i>U</i> об,
МВт	А	кВ	%	МВт	МВт	кВт/см ²	кВт/см ²	κВ
24	610	55	69	6	3,3	29	18,6	5,0
18	490	54	69	4	2,8	19	15,8	4,4

При расчёте удельных нагрузок площадь ламелей, обращённая к катоду, принималась равной 70 % от общей площади цилиндрического анода и составила 440 см² для варианта с N = 20и 210 см² для варианта с N = 6, площадь катодной поверхности составила соответственно 450 и 175 см². Предельные токи в таблицах определены при плотности тока термоэмиссии 1 А/см².

Сравнивая данные таблиц, можно увидеть, что конструкция с N = 20 способна обеспечить почти втрое большую выходную мощность, благодаря существенно большему току срыва. Первым фактором, обуславливающим увеличение тока срыва в приборе с N = 20, является то, что ток срыва прямо пропорционален числу электронных спиц n = N/2, так как с ростом n увеличивается число источников вторично-эмиссионного тока. Вторая причина – благоприятные условия вторично-электронной бомбардировки, благодаря близости к оптимуму скорости обратных электронов.

Из-за высокого напряжения U_{00} в варианте с N = 6 на катоде рассеивается примерно в 4 раза большая мощность p_{κ} , достигающая величины 15,8 Вт/см² при скважности 1000. Охлаждаемый излучением катод нагревается при этом до температуры выше 1400 °С, следовательно, во время работы не требуется дополнительного подогрева. В то же время катод прибора с N = 20 имеет рассеиваемую мощность 3,8 Вт/см², и для поддержания оптимальной температуры требуется дополнительный подогрев.

В итоге прибор с N = 20 и окисно-иттриевым катодом способен обеспечить в 2,8 раза более высокую выходную мощность, чем прибор с N = 6.

Следует заметить, что попытки развития площади пространства взаимодействия путем существенного увеличения N (так называемый торомагнетрон) закончились неудачей из-за недостаточного разделения частот между азимутальными видами колебаний. Далее за оптимальную величину принимаем N =16.

3. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ДИАМЕТРОВ АНОДА И КАТОДА

Влияние диаметров анода и катода на выходные характеристики магнетрона удобнее анализировать, оперируя параметром q, описываемым соотношением (2). Его можно назвать относительным поперечным размером пространства взаимодействия. При q = 1 отношение зазора анод – катод $\Delta r = r_a - r_\kappa$ к половине замедленной длины волны $\Lambda_{cp} = 2\pi (r_a + r_\kappa)/N$ также равно единице. Это «правило квадрата» можно представить в виде:

$$\Delta r = \Lambda_{cn}/2.$$

Для многих магнетронов этот параметр находится в интервале 0,8...1,5. Расчеты проводились для двух вариантов магнетрона, отличающихся параметром q. Остальные данные соответствуют магнетронам, рассмотренным в предыдущем разделе, кроме магнетронов с числом ламелей N=16.

Существенное отличие этих приборов состоит в величине тока срыва и соответствующей предельной мощности. При q = 0,8 они почти в два раза выше, чем при q = 1,5. В результате мощности этих приборов равны соответственно 43 и 22 МВт. Вместе с тем эффект повышения КПД проявляется лишь в самом начале ВАХ. Дело в том, что с уменьшением зазора анод – катод возрастают потери на катоде, особенно это заметно в начале ВАХ, и в основном с этим связано падение КПД при малых q. В результате в варианте с q = 1,5 при мощности 22 МВт





КПД составляет 79 %, а при мощности 55 МВт – около 65 %. Следовательно, прибор с большим *q* выгоднее использовать при малых уровнях выходной мощности.

Уменьшение тока срыва при больших q обусловлено малыми скоростями обратных электронов; в частности, для варианта q = 1,5 величина U_{00} не превышает 300 В. Для варианта с q = 0,8 величина U_{00} достигает 3 кВ при рабочем токе анода.

Расчетные токи срыва показаны на рис. 4.

Сравнивая характеристики вари-

антов магнетронов (табл. 3), можно увидеть, что оптимум по сочетанию высокой мощности и КПД может лежать между крайними значениями *q*.

Таблица 3

q	<i>Р_н</i> , МВт	U _а , кВ	I _a , A	I _{max} , A	η ₀ , %
1,5	23	60	470	625	81
1,0	42	58,5	1000	1400	70
0,8	42,5	57	1090	1445	68

Характеристики магнетронов при различных значениях параметра q

Для мощных магнетронов непрерывного действия, где из-за больших удельных нагрузок используется начальный участок ВАХ с высоким КПД, представляется целесообразным выбирать большие значения *N* и *q*.

Наряду с повышением КПД за счет увеличения *q*, на практике широко применяется регулирование режима прибора магнитным полем. Здесь КПД повышается практически вдоль всей ВАХ. Однако иногда наблюдается сужение, а затем и исчезновение зоны устойчивой работы магнетрона по мере роста магнитного поля.

Оптимальное отношение ω_{μ}/ω_{0} в зависимости от рабочей длины волны можно записать так [1]:

$$\omega_{\rm n}/\omega_{\rm o} \cong 10(\lambda_{\rm o})^{1/2}.$$
(5)

Возможно, наличие связи (5) и сужение зоны устойчивой работы вызваны тем, что с ростом магнитного поля отношение ω_{μ}/ω_{0} и СВЧ-поле возрастают линейно, а плотность удерживаемого СВЧ-полем пространственного заряда – квадратично.

4. ВЛИЯНИЕ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ДЛИНЫ ПРОСТРАНСТВА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

При создании магнетрона с возможно большей выходной мощностью успех зависит в первую очередь от того, насколько удастся развить поверхности пространства взаимодействия. Однако при их увеличении волновое сопротивление замедляющей системы магнетрона уменьшается практически обратно пропорционально площади. Это происходит потому, что ячейки замедляющей структуры включены параллельно. Волновое сопротивление ячейки ρ_0 обычно представляется в виде

$$\rho_0 = (L_0 / C_0)^{1/2}, \tag{6}$$

где L_0 и C_0 – эквивалентные индуктивность и ёмкость ячейки.

Полное волновое сопротивление замедляющей системы тогда можно представить как $\rho_c = \rho_0 / K$. При этом K = NH - число элементарных ячеек замедляющей системы, где N и H - соответственно азимутальное и осевое числа ячеек (этажей).

С увеличением N растёт количество конкурирующих азимутальных видов колебаний. Увеличение H также ограничивается ростом числа конкурирующих продольных видов колебаний и неравномерностью СВЧ-поля рабочего π_0 -вида по высоте пространства взаимодействия.

В нашем анализе конкуренция видов колебаний и неравномерность поля не учитываются. Основной предмет дальнейшего исследования – влияние нагрузки, с которой непосредственно связана величина волнового сопротивления, на характеристики магнетрона.

При согласовании выходного тракта проводимость нагрузки можно представить как $G_{\rm H} = 1/\rho_{\rm c}Q_{\rm H}$. Если нагрузка рассогласована, то внешняя добротность $Q_{\rm BH}$ в фазах разгрузки и нагрузки будет в КСВН раз соответственно меньше или больше. Задавшись величиной КСВН, можно рассчитать характеристики прибора с учётом рассогласования тракта для фаз нагрузки и разгрузки.

Величина проводимости нагрузки влияет на процесс самовозбуждения магнетрона. В работе [1] получен критерий самовозбуждения, ограничивающий ВАХ «снизу» и представленный в виде

$$G_{\mu}^{*} > 2G_{\mu}\kappa, \tag{7}$$

где G_{e}^{*} – статическая электронная проводимость.

Статическая электронная проводимость определяется как $G_e^* = I_0/U^*$. Наведенный равновесный ток I_0 и минимальное напряжение синхронизма U^* описываются соответственно соотношениями (12) и (3) работы [1]. Коэффициент $\kappa = 1/(2\sqrt{\eta_{\kappa}} - 1)$ учитывает потери СВЧ-энергии в колебательном контуре. Здесь $\eta_{\kappa} = Q_{\mu}/Q_{\mu}$ – контурный КПД.

ВАХ ограничивается «сверху», когда при переборке значений относительной расстройки $\delta = Q_{\mu}(f/f_0 - f_0/f) \cong 2Q_{\mu}\Delta f/f_0$ (Δf – электронное смещение частоты) её величина превзойдёт δ_{max} .

Расчетный ток срыва составляет 1400 А, ему соответствует предельная выходная мощность 55 МВт. При рабочем токе 1000 А выходная мощность составит 42 МВт при КПД 70 % и анодном напряжении 58,5 кВ.

Мощность обратной бомбардировки и ток срыва прямо пропорциональны осевой длине пространства h_a , а волновое сопротивление ρ_c обратно пропорционально ей. Наведенный ток также прямо пропорционален h_a , поэтому при увеличении $G_{\rm H}$ и h_a не происходит нарушения критерия устойчивости (7).

Исследования влияния нагрузки на КПД показывают, что для импульсных приборов, которые работают при анодных токах, больших, чем ток максимума КПД, увеличение G_н повышает КПД при всех рабочих токах. Однако у приборов, работающих в начале ВАХ, например у магнетронов непрерывного действия, может наблюдаться экстремум в зависимости КПД от величины нагрузки.

5. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании проделанных расчётов можно сформулировать предложения по увеличению выходной мощности и КПД магнетрона:

1) повышение напряжения синхронизма, поскольку СВЧ-мощность и анодное напряжение зависят от радиуса анода как $(r_a/\lambda_0)^4$ и $(r_a/\lambda_0)^2$ соответственно;

2) наращивание осевой длины прибора, так как $P_{\mu} \sim h_a / \lambda_0$ (в созданных ранее приборах отношение h_a / λ_0 составляло несколько единиц), однако этот путь ведёт к существенному увеличению технологических трудностей;

3) увеличение ω_{μ}/ω_{0} , что также связано с необходимостью увеличения U_{a} . Возможности

увеличения магнитного поля ещё не исчерпаны, достигнутая величина $\omega_{\mu}/\omega_0 = 4$ достаточно далека от максимально допустимого значения на выбранной рабочей частоте 915 МГц;

4) увеличение *q* для смещения рабочей точки в максимум КПД и соответствующее увеличение радиуса анода для сохранения заданной мощности, это также выливается в увеличение анодного напряжения;

Пути увеличения КПД, соответствующие п. 3 и 4, ограничены тем, что рабочая длина волны и анодное напряжение гораздо меньше тех, которые позволяют получить КПД до 85 % и более.

Путь 3 привлекателен тем, что макет с высотой пространства взаимодействия h_a/λ_0 не менее 0,5 можно испытать при повышенном магнитном поле и рассогласовании нагрузки, а по результатам испытаний сделать соответствующие выводы, не прибегая к дальнейшему удлинению прибора.

Увеличение U^* и *q* может оказаться приемлемым при конструировании магнетронов непрерывного действия, где тепловые нагрузки не ограничивают уровень выходной мощности, для достижения которого не требуется слишком высокого анодного напряжения. В то же время, в отличие от импульсных приборов, здесь максимум КПД может достигаться лишь при определённой нагрузке. В магнетронах непрерывного действия, как правило, достаточно термоэмиссионного тока, поэтому в них применяется прямонакальный спиральный катод. Спираль существенно уменьшает катодные потери, способствуя увеличению КПД [1]. Благодаря перечисленным особенностям, в приборах непрерывного действия имеется больше свободы для достижения высокого КПД, чем в импульсных приборах.

Из сказанного следует, что при стремлении достичь большой импульсной мощности и КПД приходится искать компромисс. Поиски осложняются проблемой сопряжения характеристик резонаторной системы и катода для обеспечения необходимой величины анодного тока.

При грамотном конструировании электрическая прочность прибора определяется его технологией. При этих условиях можно надеяться, что 50-МВт магнетрон осуществим. Как уже отмечалось, аналоги с таким уровнем мощности существуют в см-диапазоне длин волн. С переходом в более длинноволновый диапазон, как в рассмотренном примере, можно надеяться, что электрическая прочность достижима и на уровне 100 МВт выходной импульсной мощности.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены пути оптимизации магнетрона для достижения высоких уровней мощности и КПД при умеренном анодном напряжении. Показана возможность создания магнетрона в дециметровом диапазоне длин волн с выходной импульсной мощностью 50...100 МВт и КПД до 80 % при анодном напряжении не более 75 кВ. Расчеты проведены на основе приближенной аналитической модели, предложенной автором.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Петроченков В.И*. Расчёт электрических характеристик магнетрона на основе приближённой аналитической модели // Радиотехника и электроника. – 1994. – № 11. – С. 1825-1844.

Статья поступила 13 октября 2009 г.

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.382

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ТЕПЛООТВОДОВ

А. А. Воробьев, Е. В. Воробьева, А. В. Галдецкий, М. П. Духновский, А. К. Ратникова, Ю. Ю. Федоров

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Проведено моделирование влияния параметров теплоотвода из поликристаллического CVD-алмаза на тепловые параметры монтируемых приборов; сравниваются теплоотводы из различных материалов; рассматривается эффективность использования алмазного теплоотвода для полупроводниковых приборов, изготовленных из кремния, арсенида галлия, карбида кремния и нитрида галлия.

Modeling of parameter influence of a heat sink made of polycrystal CVD-diamond on heat parameters of mounted devices has been conducted; heat sinks of different materials are compared; the effectiveness of using a diamond heat sink for semiconductor devices made of silicon, gallium arsenide, silicon carbide and gallium nitride has been considered.

КС: численное моделирование, тепловое сопротивление, теплоотвод

Keywords: <u>numerical modeling</u>, thermal resistance, heat sink

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка мощных полупроводниковых приборов и устройств на их основе включает в себя задачу эффективного отвода тепла от рабочей области прибора для снижения тепловой нагрузки на активные элементы.

Проблему отвода тепла обычно решают, применяя элементы – теплоотводы – из высокотеплопроводящих материалов.

Эффективность использования теплоотвода определяется не только его характеристиками (теплопроводностью, геометрическими размерами), но и всей конструкцией системы отвода тепла от кристалла прибора (припой, компенсатор, основание), а также самим материалом полупроводникового кристалла.

Традиционные теплоотводы из керамики на основе окиси бериллия и нитрида алюминия не обеспечивают требуемых в наше время мощностей рассеяния приборов.

Перспективным считается использование в качестве теплоотвода металлизированной пластины из поликристаллического CVD-алмаза (далее – алмазный теплоотвод). В данной работе моделировалось влияние параметров теплоотвода на тепловые характеристики полупроводниковых приборов, изготовленных из различных материалов.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Технические результаты при использовании теплоотводов в мощных полупроводниковых приборах связаны в основном с изменением теплового режима работы прибора, который характеризуется его тепловым сопротивлением R_T и изменением температуры T кристалла во время эксплуатации.

Расчет этих величин для кристаллов, смонтированных на теплоотводах из различных материалов, проводился с помощью программы численного моделирования тепловых полей от тепловыделяющих элементов прибора [1].

Программа позволяет моделировать стационарные (во времени) температурные распределения внутри твердого тела, имеющего слоистую структуру, при разной толщине и разной теплопроводности слоев.

Тепловой режим мощного полевого кремниевого транзистора

Рассматривалась модель транзистора, состоящего из кристалла кремния, алмазного теплоотвода и медного основания – фланца корпуса транзистора (рис. 1).





Предполагалось, что температура тепловыделяющей области составляет 150 °C, температура фланца корпуса транзистора – 85 °C, теплопроводность λ алмазного теплоотвода равна 600 и 1000 Вт/(м·К).

Результаты моделирования приведены на рис. 2-5.



Рис. 2. Зависимости теплового сопротивления R_T от толщины и теплопроводности λ теплоотвода размерами 3,0×4,0 мм



Рис. 3. Зависимости теплового сопротивления *R*_T от толщины и теплопроводности λ теплоотвода размерами 7,0×7,0 мм



Рис. 4. Зависимости теплового сопротивления R_T от толщины и теплопроводности λ теплоотвода размерами 10,0×10,0 мм



Рис. 5. Зависимости теплового сопротивления R_T от соотношения площадей теплоотвода $S_{_{\rm T}}$ и кристалла полевого транзистора $S_{_{\rm KD}}$

На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. При размерах теплоотвода 3,0×4,0 мм (равных размерам кристалла) наблюдается, как и ожидалось, увеличение R_{τ} с ростом толщины теплоотвода.

2. При размерах теплоотвода 7,0×7,0 мм наблюдается уменьшение R_T с ростом толщины теплоотвода (за счет бокового растекания тепла), но при достаточно большой толщине эффект компенсируется увеличением R_T . Этот эффект проявляется более сильно для алмазного теплоотвода с $\lambda = 600$ Вт/(м•К).

3. При размерах теплоотвода 10×10 мм R_T уменьшается с ростом толщины теплоотвода. При больших значениях толщины теплоотвода изменение R_T становится незначительным.

4. Толщина теплоотвода 400...500 мкм является оптимальной в большинстве случаев.

Проведен расчет зависимости максимальной температуры кристалла от λ алмазного теплоотвода для рассеиваемой мощности 25 Вт. Толщина кристалла и теплоотвода принимались равными 300 и 500 мкм соответственно, площадь теплоотвода – 10×10 мм². Данные моделирования представлены на рис. 6.



Рис. 6. Зависимость максимальной температуры кристалла Tот теплопроводности алмазного теплоотвода λ

Для сравнения: замена в этой конфигурации бериллиевой керамики с $\lambda = 200$ Bt/(м·K) на алмазный теплоотвод дает максимальную температуру 324,4 К. То есть выигрыш по температуре в этом случае получается от 35 % при теплопроводности алмаза 600 Bt/(м·K) до 52 % при $\lambda = 2000$ Bt/(м·K).

Таким образом, для конкретных размеров кристалла транзистора и величины λ можно определить оптимальные размеры теплоотвода.

Тепловой режим СВЧ-транзистора на основе арсенида галлия

В мощных арсенидгаллиевых СВЧ-транзисторах тепловыделение сосредоточено в узких областях (шириной около 0,5 мкм) под затворами, период расположения таких областей составляет 14 мкм, их длина – 75 мкм.

Рассматривалась модель [1], состоящая из ¹/₄ периода транзистора, в который входят часть кристалла GaAs, слой золота, слой электро- и теплопроводного клея и теплоотвод (рис. 7). Мощность тепловыделения на ¹/₄ элементарной ячейке кристалла принималась равной 0,02 Вт.



Рис. 7. Вид ¹/₄ элементарной ячейки транзистора с теплоотводом

Теплопроводность арсенида галлия задавалась следующей зависимостью:

Температура, К	100	200	300	400	600
λ, Вт/(м·К)	85	63	45	30	20

В табл. 1 приведены результаты расчета максимальной температуры кристалла GaAs для разных его толщин при толщине теплоотвода 500 мкм. В качестве материала теплоотвода рассматривались медь и CVD-алмаз. Температура основания задавалась 70 °C.

Таблица 1

И	1 различной его толщине и разных материалах теплоотво									
	Материал теплоотвода	Максим при то	иальная темп олщине крис	ература, °С, талла, мкм						
		30	50	100						

158

146

197

182

128

121

Cu

CVD-алмаз

Максимальная температура кристалла транзистора GaAs при различной его толщине и разных материалах теплоотвода

Проведено моделирование, показывающее зависимость максимальной температуры кристалла от толщины теплоотвода. В качестве теплоотвода рассматривались медь и алмаз. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Материал теплоотвода	Максимальная температура кристалла, °С, при толщине теплоотвода, мкм			
	100	500	2000	
Cu	114	128	195	
CVD-алмаз	111	121	162	

Максимальная температура кристалла транзистора GaAs для разных материалов и толщины теплоотвода

Исходя из расчетов, можно сделать следующие выводы:

1. Основное тепловое сопротивление в транзисторе составляет сам кристалл GaAs, а сопротивление теплоотвода играет малую роль при его разумных размерах.

2. При значительном увеличении толщины теплоотвода увеличивается тепловое сопротивление транзистора.

3. Эффективность применения алмазного теплоотвода возрастает с уменьшением толщины кристалла арсенидгаллиевого транзистора.

Тепловой режим транзистора на основе нитрида галлия

Для моделирования теплового режима транзистора на основе GaN выбиралась та же топология (размеры области тепловыделения и ячейки), как и у транзистора на GaAs.

В табл. 3 приведены результаты моделирования транзистора на GaN. Мощность тепловыделения на ¹/₄ элементарной ячейке кристалла составляла 0,02 Вт, как и в случае GaAs-транзистора. Моделировался слой GaN толщиной 7 мкм, выращенный на алмазной подложке толщиной 100 или 500 мкм. Температура основания задавалась 70 °C. Теплопроводность алмаза принималась равной 600 Вт/(м·К), GaN – 170 Вт/(м·К). С целью сравнения приведены расчетные данные для случая замены алмаза на медь.

Таблица 3

Материал теплоотвода	Максимальна криста при толщино м	ая температура пла, °С, е теплоотвода, км
	100	500
Cu	92,2	103,7
CVD-алмаз	88,8	96,3

Максимальная температура кристалла транзистора GaN для разных материалов и толщины теплоотвода

При сравнении результатов, представленных в табл. 2 и 3, видно, что особый интерес вызывает возможность применения алмаза как теплоотвода для GaN: изменение температуры кристалла GaN относительно температуры основания – фланца прибора – меньше в несколько раз по сравнению с кристаллом GaAs.

Тепловой режим диодов Шотки на карбиде кремния

Применение широкозонных карбидокремниевых диодов Шотки перспективно в силовой электронике в связи с их высокими рабочими температурами (практически до 600 °C), большой электрической прочностью (напряженность электрического поля пробоя на порядок превышает показатели кремния и арсенида галлия), хорошей теплопроводностью [2].

Были проведены расчеты теплового сопротивления R_T диода Шотки на основе SiC при использовании теплоотводов из поликристаллического CVD-алмаза [3].

Геометрические размеры диода – 2,8×2,8×0,3 мм, температура диода выбиралась равной 175 °С, теплопроводность при данной температуре принята 170 Вт/(м·К), температура фланца корпуса диода – 85 °С, теплопроводность алмазного теплоотвода – 600 и 1000 Вт/(м·К).

Качественно результаты аналогичны расчетам R_{T} для кремниевого полевого транзистора:

1. При размерах теплоотвода 2,8×2,8 мм (равных размерам кристалла) наблюдается, как и ожидалось, увеличение R_T с ростом толщины теплоотвода.

2. При размерах теплоотвода 7,0×7,0 мм наблюдается уменьшение R_T с ростом толщины теплоотвода (за счет бокового растекания тепла), но при достаточно большой толщине эффект компенсируется увеличением R_T . Этот эффект проявляется более сильно при $\lambda = 600$ BT/(м·K).

3. При размерах теплоотвода 10×10 мм R_T уменьшается с ростом толщины теплоотвода. При больших значениях толщины изменение R_T становится незначительным.

4. Толщина теплоотвода 400...500 мкм является оптимальной в большинстве случаев.

3. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛООТВОДОВ ИЗ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛМАЗА

С целью оценки эффективности проводились расчеты величины R_T мощного кремниевого полевого транзистора для различных материалов теплоотводов. Теплопроводности используемых материалов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Материал теплоотвода	λ, Вт/(м·К)
Молибден	140
Алюмонитридная керамика	180
Бериллиевая керамика	220
Медь	380
CVD-алмаз	600 - 1000

Теплопроводности	материалов	теплоотводов,	используемых	при	расчете
1 entron pob ogno ern		тепноотводов,	in en our boy en ibin		pne iei

Геометрические размеры всех теплоотводов одинаковые и выбирались равными 10,0×10,0×0,5 мм.

Эффективность теплоотвода определяется не только теплопроводностью его материала, но и величиной R_{τ} соединения полупроводникового прибора с теплоотводом.

Конструкция анализируемого кремниевого полевого транзистора представлена на рис. 8.





Толщина слоев припоя 2 и 4 составляла 0,01 и 0,005 мм соответственно, толщина медного основания 5 – 3 мм, λ для припоя принималась равной 30 Вт/(м·К). Результаты расчетов приведены на рис. 9.



Рис. 9. Зависимость нормированного теплового сопротивления *R*_{*T*} кремниевого полевого транзистора от λ теплоотвода

Анализировалась эффективность применения поликристаллического алмаза в качестве теплоотвода для полупроводниковых приборов с различной теплопроводностью.

Результаты расчетов R_{T} приведены на рис. 10.



Рис. 10. Зависимость рассеиваемой мощности *P* от теплопроводности λ материала полупроводникового кристалла при двух температурах *T* теплоотвода

Видно, что наиболее эффективно применение теплоотводов из поликристаллического алмаза для полупроводниковых приборов с большой теплопроводностью: на основе карбида кремния и нитрида галлия.

Для приборов на основе арсенида галлия применение алмазного теплоотвода целесообразно только при малой толщине кристалла или при обратном его монтаже [1].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные расчеты позволяют сделать вывод о перспективности использования теплоотводов из поликристаллического алмаза для полупроводниковых приборов. Эффективность применения теплоотводов возрастает с увеличением теплопроводности материала полупроводникового кристалла.

Разработанная программа моделирования тепловых режимов позволяет определить оптимальные размеры теплоотвода для конкретных размеров кристалла прибора и величины λ теплоотвода.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-02-01121)

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев А.А., Галдецкий А.В., Ипполитов В.М. Моделирование теплового режима мощных транзисторов и МИС и новый метод монтажа кристаллов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 17 Международной конференции. – 2007. – Т. 1. – С. 67-68.

2. Полищук А. Применение карбидокремниевых силовых диодов Шотки в IGBT инверторах с жестким переключением // Силовая электроника. – 2006. – № 1. – С. 8-12.

3. Духновский М.П., Ратникова А.К., Федоров Ю.Ю. Исследование влияния свойств теплоотводов на тепловое сопротивление карбидокремниевых диодов Шотки // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2009. – № 5-6. – С. 43-45.

Статья поступила 15 декабря 2010 г.

УДК 621.3.04.77.029.64

ПРОСТОЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ТЕПЛООТВОДА В ГИС СВЧ

В. А. Иовдальский, Н. В. Ганюшкина, И. П. Чепурных

ФГУП «НПП»Исток», г. Фрязино

Предложен простой инженерный метод расчета эффективности дополнительного теплоотвода при двухъярусном размещении кристаллов ПТШ в ГИС СВЧ усилителей мощности. Метод позволяет при помощи полиномиальной эмпирической зависимости рассчитать геометрию дополнительного теплоотвода в зависимости от теплопроводности его материала и мощности транзисторов.

A simple engineering method of calculating the efficiency of heat sinking at double-deck arrangement of MESFET chips in HIC microwave power amplifier is proposed. Using polynomial empirical dependence the method allows to calculate the geometry of an extra heat sink versus thermal conductance of its material and transistor power.

КС: кристалл транзистора, двухъярусное расположение, теплоотвод, полиномиальная <u>эмпирическая зависимость, программа расчета, трехмерная тепловая модель</u>

Keywords: transistor chip, double-deck arrangement, heat sink, polynomial empirical dependence, calculation program, 3-D thermal model

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время появились новые конструкции ГИС СВЧ, позволяющие эффективно отводить тепло от кристаллов полупроводниковых приборов [1]. Одной из них является конструкция с двухъярусным расположением кристаллов транзисторов, которая может быть использована для эффективного сложения их мощности [2, 3]. Однако, в связи с новизной данной конструкции, до сих пор не существовало простой методики расчета эффективности теплоотвода от транзисторов, которой могли бы воспользоваться разработчики блоков РЭА. Применение же для этих целей программ расчета трехмерных тепловых моделей конструкций вызывает определенные трудности и требует специальной подготовки специалистов [4].

2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

При конструировании ГИС СВЧ с использованием двухъярусного расположения кристаллов транзисторов для суммирования их мощности возникает необходимость правильного расчета геометрических размеров теплопроводящей пластины (теплоотвода). На рис. 1 представлена конструкция фрагмента ГИС СВЧ, в которой складывается мощность двух пар полевых транзисторов с барьером Шотки (ПТШ). В каждой паре складывается мощность транзисторов с балочными выводами, причем кристаллы транзисторов расположены в два яруса, т. е. один



Рис.1. Фрагмент мощной гибридной интегральной схемы СВЧ-диапазона: *1* – диэлектрическая подложка; *2* – топологический рисунок металлизации; *3* – экранная заземляющая металлизация; *4* – металлическое основание; *5* – отверстие в диэлектрической подложке; *6* – выемка в металлическом основании; *7* – кристаллы транзисторов; *8* – плоские балочные выводы кристаллов транзисторов; *9* – выступ на металлическом основании; *10* – монтажные площадки; *11* – теплопроводящая пластина; *12* – канавка в электро- и теплопроводящей пластине; *13* – электро- и теплопроводящее связующее вещество

над другим. Их электрическое соединение осуществляется путем сварки однофункциональных балочных выводов, а теплоотвод и заземление – за счет электрического и теплового контакта с теплопроводящей пластиной и выступом на металлическом основании.

Для простоты расчетов из представленной конструкции выделим более простой вариант, а именно: с двумя кристаллами 7 и охватывающей один из них теплопроводящей пластиной 11. Другой кристалл 7 расположен в выемке 6 выступа 9 металлического основания 4. Тепловая осесимметричная модель такой конструкции представлена на рис. 2. Теплопроводящая пластина 11 может быть частично сделана из материала с высокой электропроводностью, при этом соединение с монтажной площадкой необходимо выполнить с использованием электро- и теплопроводящего связующего вещества.

При изготовлении теплопроводящей пластины из диэлектрика должны быть металлизированы поверхность канавки 12 и поверхность места соединения пластины с монтажной площадкой, а их соединение должно быть выполнено за счет электро- и теплопроводящего связующего вещества.

Устройство работает следующим образом. При подаче сигнала на кристаллы транзисторов 7, включенных параллельно, происходит усиление мощности входящего сигнала и ее суммирование. При этом в кристаллах транзисторов выделяется тепло, которое отводится от кристалла одного транзистора через выступ 9 на металлическом основании 4, а от кристалла другого транзистора через теплопроводящую пластину 11, монтажную площадку 10 и выступ 9 на металлическом основании 4.



Рис. 2. Тепловая осесимметричная модель мощной гибридной интегральной схемы СВЧ-диапазона:

позиции 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12 соответствуют позициям на рис. 1; положение точки A (A0, A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7) определяет геометрические размеры электро- и теплопроводящей пластины; $t_{\text{в max}}$ и $t_{\text{н max}}$ – максимальные температуры нагрева верхнего и нижнего кристаллов транзисторов; заштрихованная область теплопроводящей пластины – это поле температур, описываемое приведенной полиномиальной зависимостью и условием минимальной разности температур кристаллов транзисторов

Размеры теплопроводящей пластины должны обеспечивать эффективный теплоотвод и, кроме того, не ухудшать существенно массогабаритные характеристики ГИС. Эффективность отвода тепла будет зависеть от мощности используемых транзисторов, а также от теплопроводности материала самой пластины. Таким образом, оптимизация конструкции ГИС СВЧ является многофакторной задачей и может вызывать определенные трудности у разработчиков. Для решения данной задачи требуется простая методика инженерных расчетов, удобная для практического применения.

3. РАСЧЕТНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В связи с трудностями практического применения трехмерных программ для расчета геометрии эффективного теплоотвода от транзисторов при их двухъярусном расположении возникает необходимость упрощения методики расчета и определения соответствия полученных результатов с результатами ранее используемых методов [4].

В данной работе предлагается метод, который позволяет при помощи относительно простой полиномиальной эмпирической зависимости рассчитать геометрию дополнительной теплопроводящей пластины, в зависимости от теплопроводности ее материала и мощности транзисторов. В конструкции ГИС, представленной на рис. 1, ширина выступа металлического основания и теплопроводящей пластины равны ширине кристалла транзистора, что обеспечивает короткие выводы кристаллов ПТШ. Толщина дна канавки *С* и расстояние *В* от края канавки до ближайшего края пластины выбраны такими, чтобы обеспечивалась минимальная разность максимальных температур нагрева кристаллов:

$$\Delta t = t_{\mu_{\text{max}}} - t_{\mu_{\text{max}}} = (10/9) Q [P(\lambda) - 1,6308], \tag{1}$$

где $t_{_{\rm B}\,{\rm max}}$ – максимальная температура нагрева кристалла, расположенного в канавке теплопроводящей пластины; $t_{_{\rm H}\,{\rm max}}$ – максимальная температура нагрева кристалла, расположенного в выемке выступа металлического основания. Причем $t_{_{\rm B}\,{\rm max}} = (10/9) Q(P(\lambda)), t_{_{\rm H}\,{\rm max}} = (10/9) Q \cdot 1,6308$, где $Q \le 10$ Вт – мощность кристаллов транзисторов,

$$P(\lambda) = P_0(x; y) + (1/2)P_1(x; y)$$
⁽²⁾

– полиномиальная зависимость, λ – удельная теплопроводность материала теплопроводящей пластины, $P_0(x; y)$ и $P_1(x; y)$ – полиномы второй степени, зависящие от величин *x* и *y*.

$$P_{0}(x; y) = 1,85 + 0,169y^{-1} - 4,285x^{-1} - 0,516x^{-1}y^{-1} + 0,056y^{-2} + 10,691x^{-2};$$
(3)

$$P_{1}(x; y) = 0,639 + 0,282y^{-1} - 1,622x^{-1} - 0,51x^{-1}y^{-1} + 0,138y^{-2} + 3,736x^{-2}.$$
 (4)

Здесь x = 1,7...4,6 мм; y = 0,25...1,65 мм, что соответствует условиям 0,1 < B < 3,0 мм и 0,1 < C < 1,5 мм.

Геометрические размеры теплопроводящей пластины *11* ограничиваются положением точки *A* (*A0*, *A1*, *A2*, *A3*, *A4*, *A5*, *A6*, *A7*). Результаты расчетов, проведенных для всех указанных восьми вариантов положения точки *A* на осесимметричной модели фрагмента ГИС СВЧ (см. рис. 2), представлены в сводной таблице результатов расчета с использованием предложенной эмпирической формулы и с применением трехмерной программы расчета. А рис. 3 и 4 наглядно показывают полученные результаты и поясняют смысл налагаемых ограничений на геометрические размеры теплопроводящей пластины, а также позволяют оценить соответствие результатов расчета, полученных разными методами.

orpamme, °C,	1 , , ,	10	534,0	176,0	81,0	374,0	127,6	63,2	356,6	116,6	54,4	179,5	68,7	34,6	100,4	41,4	23,6	83,64	34,3	19,2	79,8	33,2	19,0	77,6	32,2	19.0
-мерной про	при Q, B_1	5	267	88	40,5	187	63,8	31,6	178,3	58,3	27,2	8'68	34,3	17,3	50,2	20,7	11,8	41,8	17,2	9,6	6'68	16,6	9,5	38,85	16,1	9.5
t _{a max} 110 3-		0,9	48,2	16.0	7,3	33,7	11,5	5,7	32,1	10,5	4,9	16,15	6,18	3,11	9,04	3,72	2,13	7,53	3,09	1,73	7,2	3,0	1,72	7,0	2,9	1.72
J. ((), <i>\</i> ,	10	744,6	231,3	85,3	409,9	136,8	59,1	383,6	127,7	54,9	181,4	67,8	35,4	103,0	41,6	24,2	85,03	34,3	19,9	81,7	33,3	19,6	77,8	32,3	19.4
(О- У) по (I	г) от (ж. (ж.) при Q, Вт	5	372,0	115,0	42,6	204,0	68,0	29,0	191,0	64,0	27,0	90,7	33,8	17,7	51,5	20,8	12,1	42,5	17,1	9,9	40,8	16,6	9,8	38,9	16,1	9.7
t	vB max	6'0	66,974	20,809	7,675	36,9	12,3	5,3	34,5	11,5	4,9	16,3	6,1	3,2	9,3	3,7	2,2	7,6	3,1	1,8	7,3	3,0	1,8	7,0	2,9	1.7
	$P(\lambda)$	ПО (2)	66,974	20,809	7,675	36,892	12,31	5,316	34,523	11,495	4,943	16,323	6,098	3,188	9,268	3,745	2,174	7,653	3,086	1,787	7,353	3,0	1,762	7,001	2,908	1.743
	$P_1(x,y)$	по (4)		6,242			3,324			3,114			1,383			0,747			0,617			0,589			0,553	
	$P_0(x,y)$	ПО (3)		4,554			3,654			3,387			2,497			1,8			1,479			1,468			1,467	
	کی ت	BT/(MM'K)	0,1	0,384	2,0	0,1	0,384	2,0	0,1	0,384	2,0	0,1	0,384	2,0	0,1	0,384	2,0	0,1	0,384	2,0	0,1	0,384	2,0	0,1	0,384	2.0
TTTOTI	(A, MM)	Л		0,16			0,21			0,25			0,5			1,15			1,65			2,0			3,0	
Koon	TOUKN	x		1,61			1,66			1,7			1,95			2,6			4,6			5,0			6,0	
	Номер	точки А		0			Ι			0			ŝ			4			S			9			~	

таблицы	
Продолжение	

Оценка соответствия			Недостаточное		Удовлетвори-	тельное		Action	vopomee								Отличное								
вия %) Т	10	41,0	27,0	6,8	10,1	8,4	9,1	7,9	11,3	1,4	1, 17	1,8	4,85	3,14	0,86	10,9	2,1	0,00	61,0	3,08	0,93	66,0	0,32	0,7	45,0
Процент соответст $\Delta t_2 \times 100$ при Q, B	5	40,7	34,2	0,3	9,55	7,67	11,5	7,5	11,6	1,1	1,2	2,0	5,1	3,16	0,9	9,7	2,0	0,74	55,6	2,9	0	68	0,3	0	45,5
не(⊽	0,9	40,0	33,4	6,5	96'6	8,0	9,76	7,86	11,2	0	1,0	1,7	5,96	3,56	0,9	13,2	1,69	0,6	53,8	1,78	0	66,7	0	85,7	16,7
ç	10	210,6	45,3	4,3	35,9	9,2	-4,1	27,0	11,1	0,5	1,9	-0,9	0,8	2,6	0,2	0,6	1,38	-0,006	0,66	1,9	0,14	0,58	0,19	0,1	0,4
$\Delta t_1 - \Delta t_2$, при Q, B_T	5	104,94	27,0	0,1	17,0	4,2	-2,6	12,7	5,7	-0,2	0,95	-0,53	0,42	1,3	0,11	0,27	0,68	-0,06	0,3	0,9	0	0,3	0,1	0	0,2
⊲=	0,9	18,77	4,809	0,375	3,2	0,8	-0,4	2,4	1,0	0	0,15	-0,08	0,09	0,265	-0,02	0,07	0,1	0,01	0,07	0,1	0	0,08	0	0,6	-0,02
i max aMMe, °C,	10	515,88	167,88	62,88	355,88	109,48	45,08	338,48	98,48	36,28	161,38	50,58	16,48	82,28	23,28	5,48	65,52	16,18	1,08	61,68	15,08	0,88	59,48	14,08	0,88
2= t _{в тах} – t ₁ эной прогр при <i>Q</i> , Вт	5	258,0	78,94	31,44	177,94	54,74	22,54	169,24	49,24	18,14	80,69	25,27	8,22	41,14	11,63	2,77	32,76	8,1	0,54	30,84	7,54	0,44	29,74	7,04	0,44
<u>М</u> по 3-мер	0,9	46,6	14,4	5,7	32,1	9,9	4,1	30,5	8,9	3,3	14,55	4,58	1,51	7,435	2,12	0,53	5,9	1,49	0,13	5,6	1,4	0,12	5,4	0,7	0,12
_{н тах} (<i>Q</i>)), Вт	10	726,48	213,18	67,18	391,78	118,68	40,98	365,48	109,58	36,78	163, 28	49,68	17,28	84,88	23,48	6,08	6'99	16,174	1,74	63,58	15,22	1,46	59,67	14,18	1,28
$_{\rm ax}(Q,\lambda) - t_{\rm f}$, °C, при ξ	5	362,94	105,94	31,54	194,94	58,94	19,94	181,94	54,94	17,94	81,64	24,74	8,64	42,44	11,74	3,04	33,44	8,04	0,84	31,74	7,54	0,74	29,84	7,04	0,64
$\Delta t_{\rm l} = t_{\rm bn}$ TO (1)	6,0	65,374	19,209	6,075	35,3	10,7	3,7	32,9	9,9	3,3	14,7	4,5	1,6	7,7	2,1	0,6	6,0	1,5	0,2	5,7	1,4	0,2	5,4	1,3	0,1
λ, Bt/(MM·K)		0,1	0,384	2,0	0,1	0,384	2,0	0,1	0,384	2,0	0,1	0,384	2,0	0,1	0,384	2,0	0,1	0,384	2,0	0,1	0,384	2,0	0,1	0,384	2,0

Примечание. Согласно (1), при Q = 0.9; 5 и 10 Вт $t_{\text{н max}}(Q) = 1,6$; 9,06 и 18,12 °С



Рис. 3. Зависимости разности максимальных температур нагрева кристаллов транзисторов в конструкции ГИС СВЧ с двухъярусным расположением кристаллов от теплопроводности материала теплопроводящей пластины и ее геометрических размеров для мощности транзисторов Q = 0.9 Вт:

положение точки A, определяющее геометрию теплопроводящей пластины, обозначено так же, как в таблице ($\mathbb{N} \ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$); заштрихованные области иллюстрируют величину несоответствия в результатах расчетов, полученных при использовании трехмерной программы расчета и эмпирических полиномиальных зависимостей

4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ показывает, что в примерах A0 ($B_{A0} = 0,01$; $C_{A0} = 0,01$) и $A1(B_{A1} = 0,06; C_{A1} = 0,06)$ результаты расчетов недостаточно хорошо согласуются с результатами, полученными с помощью трехмерной программы (величина заштрихованных областей, характеризующая расхождение результатов расчета, значительная), поэтому предложенное математическое выражение использовать нецелесообразно. Кроме того, ограничение выбора минимальных размеров *B* и *C*



Рис. 4. Иллюстрация соответствия результатов расчета тепловой модели ГИС различными методами (см. сводную таблицу): полиномиальной эмпирической зависимости и с использованием программы расчета трехмерных тепловых моделей

значением не менее 0,1 мм, связанное с обеспечением прочности и жесткости конструкции, исключает возможность использования вариантов A0 и A1. Из рис. 4 видно, что с увеличением теплопроводности материала теплопроводящей пластины 11 расхождение в результатах расчетов, выполненных различными методами, снижается. Даже для точки 2 различия не превышают трех градусов. Для остальных точек различия составляют не более одного градуса и стремительно уменьшаются по мере увеличения теплопроводности материала теплопроводящей пластины. Таким образом, варианты A0 и A1 находятся за пределом указанных ограничений и использоваться не могут.

Учитывая, что теплопроводность материала теплопроводящей пластины вряд ли будет менее 0,25 Вт/(мм·К), можно утверждать, что разница в температурах нагрева кристаллов транзисторов не будет слишком большой даже для более мощных транзисторов, чем используемых в расчетах (0,9 Вт, см. рис. 3 и 4). Для более мощных транзисторов указанные зависимости будут аналогичными.

Примеры вариантов *А6* и *А7* также находятся за пределами указанных ограничений, так как дальнейшее увеличение *В* и *С* не приводит к улучшению теплоотвода (см. рис. 3, 4), а лишь ухудшает массогабаритные характеристики.

Таким образом, варианты *A0*, *A1* и *A6*, *A7* находятся за пределом указанных ограничений и использоваться не могут.

Варианты примеров реализации A2...A5 лежат в пределах указанных рекомендуемых ограничений и иллюстрируют возможность создания мощной ГИС СВЧ-диапазона с улучшенным теплоотводом и массогабаритными характеристиками, а также с повышенной технологичностью.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы получено следующее:

1) показана принципиальная возможность упрощения методики расчета геометрических размеров дополнительного теплоотвода от верхнего кристалла транзистора ПТШ в ГИС СВЧ при двухъярусном расположении транзисторов;

2) предложена полиномиальная эмпирическая зависимость, позволяющая рассчитать геометрию дополнительной теплопроводящей пластины, в зависимости от теплопроводности ее материала и мощности транзисторов в ГИС СВЧ при двухъярусном расположении кристаллов ПТШ;

3) проведено сравнение результатов расчетов геометрии дополнительного теплоотвода с использованием полиномиальной эмпирической зависимости и с использованием программы расчета трехмерных тепловых моделей и показано их хорошее соответствие;

4) подтверждена обоснованность сделанных ранее ограничений геометрических размеров дополнительного теплоотвода;

5) подтверждена аналитически возможность эффективного отвода тепла от кристаллов ПТШ с мощностью до 10 Вт.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иовдальский В.А.* Концепция применения металлических вставок в диэлектрической подложке ГИС СВЧ // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2007. – Вып. 1(489. – С. 58-69.

2. *Иовдальский В.А.* Новая концепция сложения мощности кристаллов ПТШ в ГИС усилителей мощности СВЧ-диапазона // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2006. – Вып. 1(487). – С. 44-51.

3. Патент России 2298255, МПК Н 01 L 25/11. Мощная гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона / В.А. Иовдальский, В.Г. Лапин, В.А. Пчелин, В.Г. Моргунов; приоритет от 12.04.07.

4. *Иовдальский В.А., Ганюшкина Н.В.* Анализ возможности теплоотвода при двухъярусном расположении кристаллов транзисторов в ГИС СВЧ-диапазона // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2010. – Вып. 1(504). – С. 54-69.

Статья поступила 5 декабря 2010 г.

УДК 621.3.049.77.029.64

КОМПЛЕКТ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СВЧ-МИКРОСХЕМ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ А^ШВ^V ДЛЯ ППМ АФАР *X*-ДИАПАЗОНА

А. М. Темнов, К. В. Дудинов, В. А. Красник, Ю. М. Богданов, А. В. Крутов, В. Г. Лапин, С. В. Щербаков

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Разработан и начато серийное производство комплекта широкополосных (8,5...12 ГГц) монолитных интегральных схем на арсениде галлия для многоканальных приемопередающих модулей АФАР X-диапазона, включающего малошумящий усилитель, усилитель мощности, фазовращатель, аттенюатор, переключатель и защитное устройство.

A set of wide-band MMICs for X-range multi-channel R/T active phased array modules including low-noise amplifier, power amplifier, phase shifter, attenuator, switch and protective device has been developed and full-scale production has been launched.

КС: монолитная интегральная схема, гетероструктуры <u>*А*^ШВ^V, Х-диапазон, многоканальный</u> <u>приемопередающий модуль</u>

Keywords: <u>monolithic integrated circuit</u>, $A^{III}B^{V}$ heterostructures, X-range, multi-channel receiver/transmitter (R/T) module

1. ВВЕДЕНИЕ

В ноябре 2009 г. на ФГУП «НПП «Исток» была завершена работа, нацеленная на создание комплекта промышленных образцов широкополосных монолитных интегральных схем (МИС СВЧ) на гетероструктурах А^шВ^v, включающего малошумящий усилитель, усилитель мощности, фазовращатель, аттенюатор, переключатель и защитное устройство.

Технология изготовления МИС СВЧ разрабатывалась с учетом возможностей строящейся на предприятии пилотной линии, оснащенной новейшим технологическим оборудованием.

В перечень оборудования, которым в настоящее время располагает ФГУП «НПП «Исток», входят: электронный литограф; установки для взрывной литографии; установки для нанесения и проявления резиста; установки для сухого травления диэлектриков и арсенида галлия; установки для жидкостного травления канала; установка для нанесения диэлектрика; установки для прецизионной шлифовки и полировки пластин; электронный и инспекционный микроскопы; эллипсометр; установки для измерения *S*-параметров и коэффициента шума; зондовая станция для измерения характеристик МИС СВЧ непосредственно на пластине и др.

Базовый технологический маршрут по изготовлению МИС СВЧ опирается на процессы, позволяющие формировать транзисторные структуры с Т-образным затвором длиной 0,25 мкм. Маршрут включает более 100 операций, среди которых основными являются:

- формирование канала и затвора транзистора с помощью электронной литографии;

- формирование конденсаторов, резисторов, индуктивных элементов, межсхемных и контактных площадок;

- формирование верхней металлизации толщиной до 5 мкм;

- создание «воздушных мостов»;

- утонение до 25 мкм пластины;

- формирование металлизированных отверстий;

- формирование интегрального теплоотвода толщиной 30 мкм;

- разделение пластины на кристаллы путем химического фрезерования.

Эпитаксиальные и гетероэпитаксиальные структуры на пластинах GaAs поставляют на ФГУП «НПП «Исток» организации НОЦ РАН, Санкт-Петербург, [1] и ИФПСОРАН, Новосибирск.

Разработанные МИС СВЧ на гетероструктурах $A^{\rm III}B^{\rm V}$ описаны далее.

2. МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ $\mathbf{A}^{\mathrm{m}}\mathbf{B}^{\mathrm{v}}$

Малошумящий усилитель М421317

Электрическая схема малошумящего усилителя M421317 литера 1 (M421317-1) приведена на рис. 1, литера 2 (M421317-2) — на рис. 2 [2]. В состав каждой схемы входят два усилительных каскада. Длина затворов транзисторов — 0,25 мкм. Схемы работают от однополярного источника питания. Для стабилизации рабочих токов транзисторов используются цепочки автосмещения, размещенные в M421317-1 в цепях истока, а в M421317-2 в истоке транзистора первого каскада. Оба каскада усилителей в M421317-1 гальванически развязаны, а в M421317-2 гальванически связаны. Для стабилизации коэффициента усиления и обеспечения низкого КСВН каждый каскад имеет отрицательную обратную связь: в M421317-1 — по току за счет индуктивного элемента в цепи истока, а в M421317-2 — по току и напряжению за счет резистора обратной связи. Для выравнивания амплитудно-частотных характеристик усилителей во вторых каскадах дополнительно используются частотно-зависимые обратные связи.



Рис. 1. Электрическая схема двухкаскадного малошумящего усилителя М421317-1

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(505), 2010



Рис. 2. Электрическая схема двухкаскадного малошумящего усилителя М421317-2

Усилитель M421317-2 по принципиальной схеме аналогичен M421317-1, но отличается от него схемой подачи питания. В M421317-2 использовано последовательное питание транзисторов первого и второго каскадов. Применение последовательного питания позволяет в 2 раза снизить ток потребления от источника питания. Для обеспечения рабочей точки транзистора второго каскада служит делитель напряжения, позволяющий установить оптимальное напряжение на транзисторе первого каскада.

Расчет малошумящих усилителей проводился с использованием распределенных и сосредоточенных элементов согласования, размещенных на поверхности арсенидгаллиевой подложки толщиной 100 мкм.

Конструкция усилителя М421317-1 представлена на рис. 3. Усилитель вместе с транзисторами, схемами согласования, питания и развязки размещается на двух кристаллах размерами 1×1×0,1 и 1,2×1×0,1 мм; Усилитель М421317-2 выполнен в виде одного кристалла размерами 1×1,2×0,1 мм, топология его представлена на рис. 4. На входе и выходе малошумящих усилителей предусмотрены копланарные выводы для измерения характеристик МИС на пластине. Такие копланарные выводы выполняются на всех монолитных схемах.



Рис. 3. Конструкция двухкаскадного малошумящего усилителя М421317-1



Рис. 4. Конструкция двухкаскадного малошумящего усилителя М421317-2

Типичные амплитудно-частотные характеристики усилителя М421317-1 приведены на рис. 5 и 6, усилителя М421317-2 – на рис. 7 и 8.



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(505), 2010



Рис. 7. Зависимости коэффициентов шума и усиления малошумящего усилителя М421317-2 от частоты



Рис. 8. Зависимости КСВН входа/выхода малошумящего усилителя М421317-2 от частоты

Усилитель мощности М42247-1

Электрическая схема усилителя мощности приведена на рис. 9 [3]. В схеме использовано два усилительных каскада. Выходная мощность 1 Вт обеспечена сложением мощности нескольких транзисторов. Усилитель питается от двух источников. Первый импульсный источник положительной полярности подключен к цепи стоков, второй источник отрицательной полярности – к цепи затворов. Оба усилительных каскада гальванически развязаны между собой.

Длина затворов транзисторов – 0,35 мкм. Общая ширина затворов транзисторов первого каскада – 1600 мкм, второго каскада – 3200 мкм.

Для выбора рабочих точек транзисторов первого и второго каскадов используются резистивные делители, размещенные на кристалле. Для стабилизации коэффициента усиления и обеспечения низкого КСВН используются широкополосные схемы согласования.


Рис. 9. Электрическая схема двухкаскадного усилителя мощности М42247-1

Расчет усилителя проводился с использованием распределенных и сосредоточенных элементов согласования, размещенных на поверхности арсенидгаллиевой подложки толщиной 30 мкм. Выбор толщины подложки продиктован необходимостью обеспечения эффективного отвода тепла от транзисторов с высокой плотностью упаковки структуры. Топология усилителя приведена на рис. 10. Усилитель полностью согласован с 50-омным трактом. Размеры GaAsкристалла с размещенной на нем двухкаскадной схемой усилителя, включающей схемы согласования, питания и развязки, составляют 2,8×1,5×0,05 мм.



Рис. 10. Конструкция двухкаскадного усилителя мощности М42247-1

На входе и выходе усилителя предусмотрены копланарные выводы для измерения характеристик МИС на пластине.

Типичные амплитудно-частотные характеристики усилителя мощности показаны на рис. 11 и 12.



Рис. 11. Зависимости выходной мощности и коэффициента усиления усилителя мощности М42247-1 от частоты (*P*_{ву} = 30 мВт)



Рис. 12. Зависимость КСВН входа усилителя мощности М42247-1 от частоты

Шестибитный фазовращатель М44151

Электрическая схема 6-битного фазовращателя с драйвером приведена на рис. 13 [4]. Каждый бит фазовращателя сдвигает фазу на определенный дискретный угол. Фазовращатель построен по последовательной схеме (все биты включены последовательно) на основе сосредоточенных *RLC*-элементов и транзисторных ключей. С целью снижения потерь и уменьшения взаимного влияния между битами 90 и 180 град установлен однокаскадный усилитель на ПТШ с отрицательной параллельной обратной связью.

Расчет фазовращателя проводился с использованием распределенных и сосредоточенных элементов согласования, размещенных на поверхности арсенидгаллиевой подложки толщиной 100 мкм. Фазовращатель полностью согласован с 50-омным трактом. Размеры GaAs-кристалла с размещенной на нем схемой фазовращателя, включающей схемы согласования, питания и развязки, составляют 4,3×2,3×0,1мм.



На входе и выходе фазовращателя предусмотрены копланарные выводы для измерения характеристик МИС на пластине.

Уровень сложности схемы с точки зрения обеспечения удовлетворительного выхода годных характеризуется, в частности, тем, что суммарная ширина затвора ПТШ фазовращателя составляет 8,6 мм. В качестве индуктивностей применены плоские спиральные катушки с межвитковым зазором 5...8 мкм. Всего в схеме шестнадцать таких катушек.

Разработанный фазовращатель имеет две литеры:

- 6-битный фазовращатель с интегрированным драйвером М44151-1;
- 6-битный фазовращатель без драйвера М44151-2.

Конструкции фазовращателей приведены на рис. 14 и 15.



Рис. 14. Конструкция 6-битного фазовращателя с интегрированным драйвером М44151-1



Рис. 15. Конструкция 6-битного фазовращателя без драйвера М44151-2

Типичные амплитудно-частотные характеристики фазовращателя приведены на рис. 16 и 17.



Рис. 16. Относительный фазочастотный сдвиг в шести основных состояниях 6-битного фазовращателя М44151



Рис. 17. Зависимость потерь от частоты в шести основных состояниях 6-битного фазовращателя с драйвером М44151-1

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(505), 2010

Пятибитный аттенюатор М44732

Электрическая схема 5-битного аттенюатора приведена на рис. 18. Каждый бит аттенюатора изменяет его потери на определенную дискретную величину. Аттенюатор построен по последовательной схеме (все биты включены последовательно) на основе сосредоточенных *RLC*-элементов и транзисторных ключей. С целью снижения потерь все цепи аттенюатора оптимизированы.



Рис. 18. Электрическая схема 5-битного аттенюатора М44732

Расчет аттенюатора проводился с использованием распределенных и сосредоточенных элементов согласования, размещенных на поверхности арсенидгаллиевой подложки толщиной 100 мкм. Аттенюатор полностью согласован с 50-омным трактом. Размеры GaAs-кристалла с размещенной на нем схемой аттенюатора, включающей схемы согласования, питания и развязки, составляют 2,4×1,8×0,1 мм.

На входе и выходе аттенюатора предусмотрены копланарные выводы для измерения характеристик МИС на пластине.

Разработанный аттенюатор имеет две литеры:

- 5-битный аттенюатор с интегрированным драйвером М44732-1;
- 5-битный аттенюатора без драйвера М44732-2.

Конструкции аттенюаторов приведены на рис. 19 и 20.

Типичные амплитудно-частотные характеристики аттенюатора – на рис. 21 и 22.



Рис. 19. Конструкция 5-битного аттенюатора с интегрированным драйвером М44732-1



Рис. 20. Конструкция 5-битного аттенюатора без драйвера М44732-2



Рис. 22. Зависимость потерь от частоты в пяти основных состояниях 5-битного аттенюатора М44732



Рис. 22. Зависимость начальных потерь от частоты 5-битного аттенюатора с интегрированным драйвером М44732-1

Переключатель 1×2 М44224

Электрическая схема переключателя приведена на рис. 23.



Рис. 23. Электрическая схема переключателя 1×2 М44224

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(505), 2010

Переключатель построен по двухзвенной Г-образной схеме. Для компенсации влияния паразитной емкости ключевых ПТШ выбрана схема согласования со структурой ФНЧ. С целью снижения потерь все цепи переключателя оптимизированы.

Расчет переключателя проводился с использованием распределенных и сосредоточенных элементов согласования, размещенных на поверхности арсенидгаллиевой подложки толщиной 100 мкм.

Переключатель полностью согласован с 50-омным трактом. Размеры GaAs-кристалла с размещенной на нем схемой переключателя, включающей схемы согласования, питания и развязки, составляют 1,9×1,4×0,1 мм. На входе и выходе переключателя предусмотрены копланарные выводы для измерения характеристик МИС на пластине.

Разработанный переключатель имеет две литеры:

- переключатель 1×2 с интегрированным драйвером М44224-1;
- переключатель 1×2 без драйвера М44224-2.

Конструкции переключателей приведены на рис. 24 и 25.



Рис. 24. Конструкция переключателя 1×2 с интегрированным драйвером М44224-1



Рис. 25. Конструкция переключателя 1×2 без драйвера М44224-2 Типичные амплитудно-частотные характеристики переключателя приведены на рис. 26.



Рис. 26. Зависимость потерь от частоты переключателя 1×2 М44224

Защитное устройство М44419

Электрическая схема защитного устройства приведена на рис. 27 [5].

Устройство предназначено для защиты малошумящего усилителя приемника от воздействия СВЧ-сигналов большой мощности, реализовано по двухкаскадной схеме со встречно-параллельным включением диодов Шотки.

Расчет защитного устройства проводился с использованием распределенных и сосредоточенных элементов согласования, размещенных на поверхности арсенидгаллиевой подложки толщиной 100 мкм.



Рис. 27. Электрическая схема защитного устройства М44419

Конструкция защитного устройства показана на рис. 28. Устройство полностью согласовано с 50-омным трактом. Размеры GaAs-кристалла с размещенной на нем схемой защитного устройства, включающей схемы согласования, питания и развязки, составляют 1,1×0,8×0,1 мм.



Рис. 28. Конструкция защитного устройства М44419

На входе и выходе защитного устройства предусмотрены копланарные выводы для измерения характеристик МИС на пластине.

Типичные амплитудно-частотные характеристики защитного устройства показаны на рис. 29 и 30.



Рис. 29. Зависимость потерь от частоты защитного устройства М44419



Рис. 30. Зависимость КСВН входа и выхода от частоты защитного устройства М44419

3. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИС СВЧ

Для измерения параметров МИС на пластине используются зондовые станции. Они оснащены копланарными зондами (на «Истоке» разработаны собственные копланарные зонды [5]) для подключения к выводам входа и выхода МИС СВЧ.

Для подачи питания и управляющих сигналов на периферии кристаллов созданы контактные площадки. Для подключения к ним используются специальные многоконтактные зонды, разработанные также на ФГУП «НПП «Исток» [6].

Далее приведены фотографии (рис. 31), полученные с помощью микроскопа во время выполнения тестовых измерений характеристик фазовращателя, аттенюатора и переключателя на пластине с использованием зондовой станции, оснащенной копланарными и многоконтактными зондами.



a)







Рис. 31. Фотографии фазовращателя (*a*), аттенюатора (*б*), переключателя (*в*), полученные с микроскопа при проведении с помощью зондовой станции тестовых измерений характеристик

в)

4. ПРИМЕНЕНИЕ

МИС СВЧ разработаны в соответствии с требованиями группы 4У ГОСТ РВ 20.39.414.1-97 в климатическом исполнении УХЛ 4.1 по ГОСТ 15 150 и предназначены для использования в составе герметизированной аппаратуры, обеспечивающей их защиту от воздействия влаги, пыли, соляного тумана, плесневых грибов, инея, росы, агрессивных сред.

Охлаждение модуля контактное за счет теплопередачи на элементы конструкции РЭА, обеспечивающее температуру основания модуля не более +85 °C.

Вводы и выводы СВЧ-энергии модуля микрополосковые с волновым сопротивлением 50 Ом. Рабочее положение модуля произвольное.

Параметры разработанных МИС СВЧ приведены в таблице.

Параметр	Значение по ТУ			
Малошумящий усилитель М421317-1				
Рабочий диапазон частот, ГГц	8,512			
Коэффициент усиления, дБ	1520			
Коэффициент шума, дБ	≤1,5			
Выходная мощность в режиме насыщения, мВт	≥ 5			
Максимальная допустимая мощность на входе, мВт	≤ 50			
КСВН входа/выхода, отн. ед.	≤ 2			
Ток потребления, мА, от источника питания +5 В	≤ 3 5			
Габаритные размеры, мм	2,2×1×0,1			
Малошумящий усилитель М421317-2				
Рабочий диапазон частот, ГГц	8,512			
Коэффициент усиления, дБ	1520			
Коэффициент шума, дБ	≤ 4			
Выходная мощность в режиме насыщения, мВт	\geq 30			
КСВН входа/выхода, отн. ед.	≤ 2			
Ток потребления, мА, от источника питания +5 В	≤ 90			
Габаритные размеры, мм	1,2×1×0,1			
Усилитель мощности М42247-1				
Рабочий диапазон частот, ГГц	8,512			
Коэффициент усиления, дБ	1520			
Выходная импульсная мощность, Вт	≥ 1			
КПД, %	≥ 28			
КСВН входа, отн. ед.	≤ 2			
Ток потребления, мА:				
от источника питания +8 В	≤ 800			
от источника питания –5 В	≤ 50			
Габаритные размеры, мм	2,8×1,5×0,1			

Продолжение таблицы

Параметр	Значение по ТУ				
6- битные фазовращатели М44151-1 и М44151-2					
Рабочий диапазон частот, ГГц	8,512				
Средние потери, дБ	≤ 8				
Разрядность, бит (управление 6-разрядным параллельным кодом)	5				
Минимальный управляемый фазовый сдвиг, град	5,6				
Среднеквадратичная ошибка установки фазы, град	≤ 6				
КСВН входа, отн. ед.	≤2,5				
Ток потребления, мА:					
от источника питания +5 В	≤ 90				
от источника питания –5 В	≤ 30				
Габаритные размеры, мм	4,3×2,2×0,1				
5-битные аттенюаторы М44723-1 и М44723-2					
Рабочий диапазон частот, ГГц	8,512				
Начальные потери, дБ	≤ 4,5				
Разрядность, бит (управление 5-разрядным параллельным кодом)	5				
Минимальный дискрет затухания, дБ	0,5				
Максимальное ослабление, дБ	15,5				
Среднеквадратичная ошибка установки затухания, дБ	0,5				
КСВН входа, отн. ед.	≤ 2				
Ток потребления, мА, от источника питания минус 5 В	≤ 20				
Габаритные размеры, мм	2,4×1,4×0,1				
Переключатели 1x2 M44224-1 и M44224-2					
Рабочий диапазон частот, ГГц	8,512				
Вносимые потери, дБ	≤ 2				
Развязка между каналами, дБ	≥ 25				
КСВН входа/выхода, отн. ед.	≤ 2				
Ток потребления, мА, от источника питания минус 5 В	≤ 5				
Защитное устройство М44419					
Рабочий диапазон частот, ГГц	8,512				
Максимальная входная мощность, Вт	≥10				
Вносимые потери в режиме пропускания, дБ	≤1				
Максимальная просачивающаяся мощность, мВт	$\leq \overline{50}$				
КСВН входа/выхода, отн. ед.	≤ 2				

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые в России на ФГУП «НПП «Исток» разработан комплект широкополосных МИС СВЧ для приемопередающего модуля АФАР *Х*-диапазона длин волн на основе арсенида галлия: малошумящие усилители M421317-1 и M421317-2; усилитель мощности M42247-1; 6-битный фазовращатель с драйвером M44151-1; 6-битный фазовращатель без драйвера M44151-2; 5-битный аттенюатор с драйвером M44723-1; 5-битный аттенюатор без драйвера M44723-2; переключатель 1х2 без драйвера M44224-2; защитное устройство M44419.

Разработанные МИС СВЧ по комплексу параметров соответствуют лучшим зарубежным аналогам.

На все разработанные МИС выпущены технические условия.

В настоящее время на «Истоке» продолжаются работы по совершенствованию технологических процессов изготовления МИС СВЧ, оптимизации конструкции гетероэпитаксиальных структур и доработке усилителя мощности М42247-2 с выходной мощностью 10 Вт.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Maleev N.A., Zhukov A.E., Kovsh A.R.* AlGaAs/InGaAs/GaAs heterostructures based pHEMT // Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2002): 12-th International Conference. 9-13 Sept. 2002, Sevastopol, Crimea, Ukraine.

2. *Крутов А.В., Ребров А.С.* Монолитные малошумящие усилители *Х*-диапазона // Материалы Крымской конференции. 11-15 сентября 2006. – С. 183-184.

3. Полнофункциональный ряд дискретных управляющих GaAs MИC для АФАР / Ю.М. Богданов, А.В. Галдецкий, В.А. Красник и др. // Материалы Крымской конференции. 11-15 сентября 2006. – С. 185-186.

4. *Крутов А.В., Ребров А.С.* Исследование ограничительных характеристик полупроводниковых защитных устройств *Х*-диапазона // Материалы Крымской конференции. 11-15 сентября 2006. – С. 129-130.

5. Патент 2285930 РФ. Зонд для измерения электрических характеристик планарных элементов интегральных схем / А.М. Темнов, Н.В. Шульга, К.В. Дудинов; приоритет 11.04.05.

6. Патент 2293339 РФ. Многоконтактный зонд для испытания планарных элементов интегральных схем / *А.М. Темнов, Н.В. Шульга, К.В. Дудинов*; приоритет 25.07.05.

Статья поступила 15 января 2010 г.

ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.319.4

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ С ЗАДАННЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ СВЧ-КОНДЕНСАТОРОВ

В. А. Бабуров, В. Е. Земляков, В. А. Красник

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Представлены результаты по исследованию и оптимизации плазмохимического процесса осаждения пленок нитрида кремния, используемого при изготовлении тонкопленочных конденсаторов в CBЧ-приборах. Проведены исследования влияния параметров технологического процесса на электрические характеристики диэлектрика.

The results of investigation and optimization of plasma chemical process of depositing silicon nitride films used at manufacturing thin-film capacitors in microwave devices are presented. The study of the influence of technological process parameters on electrical characteristics of dielectric was conducted.

КС: нитрид кремния, плазмохимическое осаждение, конденсатор, технологический процесс

Keywords: silicon nitride, plasma chemical deposition, capacitor, technological process

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение плазменных процессов в микроэлектронике имеет довольно долгую историю, которая началась с процессов выжигания резиста в кислородной плазме [1]. За более чем 30 лет плазмохимическая обработка нашла широкое применение в технологических процессах микроэлектроники, таких, как травление металлов, травление и осаждение диэлектрических слоев [2]. Особое место плазменные процессы травления и осаждения диэлектрических покрытий занимают в технологии СВЧ монолитных микросхем [3]. Диэлектрические покрытия здесь используют для пассивации поверхности полупроводника и в качестве прослойки для создания емкостных элементов типа МДМ (металл–диэлектрик–металл). В отличие от низкочастотной электроники, здесь особые требования предъявляются к пробивному напряжению и высокочастотным потерям в диэлектрике.

В данной работе рассматривается применение стимулированных плазмой газофазных реакций осаждения (PECVD) нитрида кремния для изготовления межобкладочного диэлектрика конденсаторов в монолитных схемах на подложке из арсенида галлия.

Обычно для создания пленок диэлектриков методом PECVD используется газофазная реакция получения нитрида кремния (SiH₄ + NH₃ + N₂ \rightarrow Si_xN_yH_z + H₂), реализуемая в условиях плазменного разряда при температуре подложки 200...400 °C.

Технологические параметры данного процесса: рабочее давление, скорость газового потока, состав парогазовой смеси, мощность разряда, температура подложки и др. – являются определяющими для получения качественных пленок нитрида кремния и подбираются экспериментально, исходя из конкретных задач по использованию диэлектрика [4]. Исследования, проводимые как за рубежом, так и в России методами эллипсометрии, инфракрасной спектроскопии, Оже-спектроскопии, показали, что пленки, осажденные из плазмы, содержат ряд примесей, в частности водород и кислород [5], и это неизбежно влияет на электрофизические параметры пленок, а следовательно, определяет характеристики создаваемых на их основе СВЧ-приборов. В связи с этим исследование влияния операционных параметров технологического процесса осаждения на химический состав и электрофизические характеристики получаемых пленок является актуальной научной задачей.

2. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на оборудовании фирмы UNAXIS, используемом в установке Nextral ND200R. Конструкция реактора и система управления процессом позволяют с высокой точностью устанавливать и стабильно поддерживать во времени параметры процесса осаждения пленок диэлектриков, что гарантирует высокую воспроизводимость характеристик осаждаемых пленок. Схема используемого плазмохимического реактора изображена на рис. 1.



Рис. 1. Схема плазмохимического реактора

В экспериментах исследовалось влияние параметров технологического процесса (расход газов, мощность ВЧ-источника, температура и рабочее давление) на структуру пленки, а также на ее электрические характеристики.

На тонких слоях нитрида кремния измеряли коэффициент преломления (рис. 2) и скорость травления в буферном травителе HF:NH₃F:H₂O (рис. 3).

Для определения электрофизических параметров получаемых пленок измеряли параметры тестовых конденсаторов, изготовленных на подложках из арсенида галлия. Измеряли удельную емкость, пробивное напряжение (рис. 4) и снимали зависимость их электрической емкости от температуры (рис. 5).



Рис. 2. Зависимости коэффициента преломления нитрида кремния от соотношения рабочих газов, мощности ВЧ-источника и температуры



Рис. 3. Зависимость скорости травления нитрида кремния в буферном травителе от коэффициента преломления

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА, СЕР. 1, СВЧ-ТЕХНИКА, ВЫП. 2(505), 2010



3. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА СВОЙСТВА ПЛЕНКИ НИТРИДА КРЕМНИЯ

Плазмохимический нитрид кремния имеет коэффициент преломления в диапазоне 1,8...2,5 [6]. Оптимальный коэффициент преломления нитрида кремния для использования его в качестве изолятора и пассивирующего материала равен 2 [7].

Проведенные эксперименты показали сильную зависимость коэффициента преломления от операционных параметров технологического процесса. Также было установлено, что при уменьшении коэффициента преломления диэлектрика наблюдается увеличение скорости травления пленки в химических реактивах и пробивного напряжения (см. рис. 3 и 4).

Из рисунков видно, что коэффициент преломления в большей степени зависит от соотношения рабочих газов SiH_4/NH_3 . С увеличением моносилана в смеси газов увеличивается содержание связей Si⁻ в пленке нитрида кремния, что приводит к росту проводимости (уменьшению пробивного напряжения) и уменьшению скорости травления в химических реактивах. Известно, чем больше коэффициент преломления, тем больше диэлектрическая постоянная пленки диэлектрика є [6], что, в свою очередь, приводит к увеличению удельной емкости конденсатора при одинаковых толщинах диэлектрика. Также одним из важных параметров нитрида кремния является тангенс угла диэлектрических потерь (рис. 6).

Диэлектрики, полученные при различных параметрах технологического процесса осаждения, но имеющие одинаковый коэффициент преломления (при разных соотношениях рабочих газов, мощности ВЧ-источника, температуре и давлении), обладают близкими пробивными напряжениями и емкостью (отклонение составляет около 3 %). Данные приведены в таблице.

Коэффициент преломления	Температура подложко- держателя, °С	Мощность плазменного разряда, Вт	Рабочее давление, торр	Соотношение SiH ₄ /NH ₃	Удельная емкость конденсатора, пФ/мм ²
		25		0.6	215
	150	100	1	0.6	217
		200		0,62	212
		250		0,63	210
		300		0,67	213
		25	1,5	0,68	218
		100		0,69	219
		200		0,72	215
		250		0,78	210
1.05		300		0,95	219
1,85		25		0,21	218
		100		0,22	216
		200	1	0,22	215
		250		0,26	215
	250	300		0,27	219
	230	25		0,2	217
		100		0,22	210
		200	1,5	0,25	216
		250		0,3	212
		300		0,38	214
	150	25	1	0,7	225
		100		0,71	220
		200		0,72	222
		250		0,77	227
		300		0,8	224
		25		0,8	221
		100	1,5	0,82	225
		200		0,89	226
		250		1,1	223
1,9		300		1,2	220
		25	1	0,27	228
	250	100		0,3	229
		200		0,35	228
		250		0,58	224
		300		0,27	225
		25	1,5	0,3	224
		100		0,36	228
		200		0,4	227
		250		0,49	226
		300		0,6	227

Физические и электрические характеристики емкостных элементов



Рис. 6. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от коэффициента преломления

Для измерения электрофизических параметров пленок нитрида кремния (кроме коэффициента преломления) формировали конденсаторы. С этой целью на полуизолирующую подложку из арсенида галлия напыляли слой Ti–Au–Ti общей толщиной 0,3 мкм. На металл путем осаждения наносили нитрид кремния толщиной 0,25 мкм. Затем напыляли верхний слой металлизации Ti–Au–Ti толщиной 0,3 мкм. После этого формировали металлические мосты Ti–Au–Ti толщиной 0,4 мкм и проводили гальваническое осаждение золота. Измерения осуществляли с использованием эллипсометра фирмы Sentech и зондовой станции GW Instek LCR-819.

Исследование влияния температуры на электрофизические параметры диэлектрических пленок очень важно для успешной работы СВЧ-приборов в различных областях применения (земные и космические). Ухудшение температурной стабильности емкости приводит к деградации и, в конечном счете, к выходу прибора из строя. Исследования показали, что отклонение емкости конденсаторов при нагревании меньше у диэлектрических пленок с малым содержанием кремния. Самая высокая температурная стабильность наблюдается у пленок с коэффициентом преломления 1,85.

Анализ полученных результатов позволил провести оптимизацию плазмохимического процесса осаждения нитрида кремния для производства конденсаторов в МИС СВЧ. Оптимизация проводилась исходя из заданных критериев: удельная емкость – 200 пФ/мм², электрическая прочность максимальная, температурная стабильность во времени постоянная, коэффициент преломления – 1,85, при этом технологический процесс осаждения должен укладываться по времени в технологические рамки. Рекомендуемые параметры осаждения нитрида кремния следующие: температура подложкодержателя – 250 °C, мощность плазменного разряда – 300 Вт, рабочее давление – 1 торр, соотношение SiH₄/NH₃ – 0,4.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены основные этапы оптимизации плазмохимического процесса осаждения нитрида кремния. Исследования показали, что электрофизические свойства пленок нитрида кремния очень сильно зависят от параметров технологического процесса (мощности плазменного разряда, соотношения рабочих газов, температуры и рабочего давления). Проведенные измерения наглядно продемонстрировали, что избыточное содержание связей Si⁻ приводит к ухудшению характеристик конденсатора. На основании полученных результатов был оптимизирован плазмохимический процесс осаждения тонких пленок нитрида кремния, обладающих довольно большой электрической прочностью (9·10⁵ B/см), малым тангенсом угла диэлектрических потерь и температурной стабильностью более 98 %, а также, как показала практика производства МИС на арсениде галлия, достаточной адгезией к этому материалу. Изготовлен тонкопленочный конденсатор с электрофизическими параметрами, которые отвечают требованиям, предъявляемым к монолитным интегральным схемам СВЧ-приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плазмохимическое травление фоторезистивных пленок / И.В. Гомжин, Э.А. Лебедев, Н.Н. Федоров, О.П. Гущин // 9-я школа по плазмохимии молодых ученых России и стран СНГ. – Иваново: ИГХТУ, 1999.

2. *Амиров И.И., Изюмов М.О., Морозов О.В.* Плазмохимические процессы травления и осаждения материалов микроэлектроники в реакторе высокоплотной плазмы // 10-я школа по плазмохимии молодых ученых России и стран СНГ. – Иваново: ИГХТУ, 2002. – С. 484.

3. Применение плазменных процессов в производстве СВЧ-транзисторов с длиной затвора 0,1 мкм / *В.Е. Зем-ляков, Н.Е. Антонова, В.А. Красник, С.Ю. Шаповал* // Всероссийская конференция по физике низкотемпературной плазмы, ФНТП-2004. – Петрозаводск: ООО «СВД-Норд». – С. 161.

4. *Берлин Е.В., Сейдман Л.А.* Получение чередующихся слоев диэлектриков на основе кремния в едином процессе // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2002. – № 5. – С. 50-52.

5. News update // A₃B₅ Review the Advanced Semiconductor Magazine. – 2002. – Vol 15, No 9, Nov./Dec. – P. 20-26.

6. Технология СБИС / Под ред. С. Зи. – М.: МИР, 1986. – С.160-168.

7. *Ефремов М.Д., Володин В.А., Марин Д.В.* Вариация края поглощения в пленках SiN_x с кластерами кремния // Физика и техника полупроводников. – 2008. – Т. 42, вып. 2. – С. 202-208.

Статья поступила 8 февраля 2010 г.

МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.385.6.029.65:61

ИЗУЧЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО МЕТОДА

К. Д. Казаринов, И. Г. Полников

ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино

Предлагается опыт различных исследовательских групп, изучающих биологическое действие микроволнового излучения, используя эффективный хемилюминесцентный метод анализа быстропротекающих биохимических реакций, которые сопровождают образование свободных радикалов. Представлен пример конструкции хемилюминометра, рассмотрена кинетика хемилюминесценции, указаны параметры контроля данного процесса и приведены способы усиления сверхслабого свечения продуктов жизнедеятельности клетки с помощью химических и физических активаторов.

The experience of different research groups studying biological effect of microwave radiation using the effective hemiluminescent method of analyzing fast biochemical reactions which accompany the formation of free radicals is presented. A sample of hemiluminometer design is shown, hemiluminescence kinetics is considered, the parameters of the process control are indicated and the ways of strengthening superweak lightening of cell life cycle products using chemical and physical activators are given.

КС: хемилюминесценция, активные формы кислорода, микроволновое излучение, хемилюминометр, <u>перекисное окисление липидов</u>

Keywords: <u>hemiluminescence, active forms of oxygen, microwave radiation, hemiluminometer, lipid peroxidation</u>

1. ВВЕДЕНИЕ

Медико-биологическое действие электромагнитного излучения микроволнового диапазона исследуется уже несколько десятков лет, и стимулируется этот процесс как необходимостью защиты окружающей среды от всевозрастающего воздействия данного вида излучения, так и широким использованием микроволн в терапевтических целях. Пионерами магистральных направлений изучения этой проблемы были разработчики генераторов излучения и элементов СВЧ-техники из ФГУП «НПП «Исток» во главе с академиком Н. Д. Девятковым [1, 2].

Для исследования механизмов биоэффектов микроволнового излучения на клеточном и субклеточном уровнях в разные годы использовался широкий и разнообразный арсенал биофизических и биохимических методов [3]. Оценка скорости окислительной деструкции липидов – основного строительного материала биологических мембран – представляет интерес при изучении различных процессов в биосистемах и физико-химических воздействий на них. Одним из наиболее перспективных методов исследования перекисного окисления липидов (ПОЛ) в биологических системах является измерение сверхслабого свечения, или хемилюминесценции (ХЛ), сопровождающего реакции цепного окисления органических соединений. Этот метод по сравнению с традиционными биохимическими обладает рядом существенных преимуществ: более высокой чувствительностью и безынерционностью, что позволяет изучать кинетику быстропротекающих реакций в реальном масштабе времени, не требует деструкции объекта и не вносит возмущения в изучаемые процессы.

В наши дни физико-химические явления, определяющие превращение энергии реакций в биохимических системах в излучение света, успешно расшифровываются и повсеместно используются в медико-биологических исследованиях с помощью специальных приборов – хемилюминометров [4-8]. Предлагаются наборы реактивов для анализа различных видов патологии в организмах человека и животных. Продолжается поиск новых соединений, обладающих способностью усиливать ХЛ активных продуктов жизнедеятельности клеток (свободных радикалов и пероксидов).

Введение инициатора ПОЛ в суспензию клеток, органелл или липосом сопровождается кинетикой ХЛ, состоящей из нескольких стадий: «быстрой вспышки» (показана стрелкой), латентного периода, «медленной вспышки» и стационарного свечения (рис. 1). Повторное введение инициатора ПОЛ вызывает вторую «быструю вспышку» ХЛ и все последующие стадии кинетики (на рисунке не показаны).



Рис. 1. Типичная кинетика XЛ суспензии клеток или липосом после инициирования ее ферроионами или импульсом электрического поля микросекундной длительности $(I_{akr} - максимальное приращение медленной вспышки над уровнем спонтанного свечения клеток <math>I_{cn}$)

Наиболее удобным параметром для изучения степени активации ХЛ различными соединениями оказалась максимальная интенсивность ХЛ на стадии «медленной вспышки». При выборе этого параметра воспроизводимость результатов в наших работах была наиболее высокой. На стадии «быстрой вспышки» разброс максимальной интенсивности достигал 10 %, что обусловлено зависимостью регистрируемого параметра от скорости введения инициатора ПОЛ в измеряемый образец и интенсивности перемешивания последнего. В некоторых работах для оценки ХЛ использовались размер площади под кривой «медленной вспышки», продолжительность латентного периода, а также скорость увеличения ХЛ в период «медленной вспышки».

Теперь рассмотрим, следуя работе [4], причины низкой интенсивности ХЛ продуктов реакций свободных радикалов и возможные способы ее усиления. Прежде всего, следует отметить очень низкую концентрацию самих радикалов в биосистемах из-за их повышенной химической активности, поэтому невелики и скорости биохимических реакций, сопровождающихся ХЛ. Кроме того, в большинстве взаимодействий между молекулами или радикалами электрон переносится не на уровень возбужденного состояния, а на самый нижний свободный уровень, и последующего высвечивания кванта света не происходит. И наконец, даже в том случае, когда образуется возбужденная молекула продукта биохимической реакции, вероятность высвечивания кванта света довольна невелика из-за перехода энергии возбуждения в тепло. Такая ситуация приводит к необходимости усиливать квантовый выход возбуждения молекул продуктов ПОЛ с помощью химических активаторов ХЛ: люминола и люцигенина. Что же касается повышения квантового выхода люминесценции возбужденных продуктов, то эту функцию выполняют вещества (физические активаторы ХЛ), которые перехватывают возбужденные состояния продуктов и высвечивают кванты света с высокой эффективностью. Химическим активатором может быть любое соединение, ХЛ-реакции которого в изучаемой системе сопровождаются выходом возбужденных продуктов, имеющих достаточно высокий квантовый выход люминесценции [4].

Спектральное распределение ХЛ суспензии липосом на разных стадиях кинетики процесса ПОЛ, вызванного введением инициатора (в данном случае ферроионов), исследовалось в работах [9-11]. Авторы этих работ отмечают, что, несмотря на некоторые различия, спектры ХЛ на стадиях «быстрой» и «медленной» вспышек оказались довольно сходными: положение максимума спектров оставалось неизменным (530...550 нм), сдвиг в длинноволновую область спектра ХЛ при протекании ПОЛ не обнаружен. На этом основании можно сделать вывод о том, что в исследованной системе механизм ХЛ и условия протекания ХЛ-реакций примерно одинаковы во время всей кинетики и почти не зависят от скорости свободнорадикальных процессов.

Спектр ХЛ при ПОЛ в суспензии липосом, индуцированном ферроионами, представлен в работе [9]. Анализ этого спектра показывает, что в интегральную ХЛ при ПОЛ вносят вклад несколько возбужденных состояний с максимумами спектра эмиссии в области 460, 550 и 630 нм, которые образуются в процессе биохимических реакций. Природа эмиттеров, ответственных за это излучение, пока точно не установлена. Сверхслабое излучение с максимумом в районе спектра 460...470 нм может определяться как реакциями водных радикалов, так и синглетными возбужденными состояниями кетонов, образующихся при рекомбинации пероксирадикалов ненасыщенных жирных кислот; максимум ХЛ при 630 нм может быть связан с эмиссией димеров синглетного кислорода. Для разделения ХЛ, обусловленной ХЛ-реакциями водных радикалов, и ХЛ при ПОЛ использовались активаторы с различным механизмом действия. Это, прежде всего, люминол, действие которого основано на двухступенчатом свободнорадикальном оксигенировании активатора в реакциях с водными радикалами. Возбужденный продукт дает эмиссию в синей области спектра. Для активации ХЛ липидных радикалов в работе [9] применялся комплекс редкоземельного иона Eu³⁺ и тетрациклина. Механизм активации ХЛ в этом случае основан на безызлучательном переносе энергии по триплет-триплетному механизму с возбужденного продукта рекомбинации перекисных радикалов (возможно, триплетного кетона) на редкоземельный ион и последующей эмиссии с его флуоресцентного уровня (максимум – в районе 618 нм). В этих исследованиях было обнаружено, что люминол и Eu³⁺-тетрациклиновый комплекс активируют различные группы XЛ-реакций при ПОЛ, индуцированном ферроионами в липосомах. Эти группы биохимических реакций можно отнести соответственно к водной и липидной фазам. Спектры ХЛ этих двух активаторов не перекрываются и легко могут быть разделены при их совместном использовании [10]. Таким образом, был предложен метод одновременного контроля за интенсивностью реакций водных и липидных радикалов при ПОЛ в биомембранах. Наиболее эффективным сенсибилизатором ХЛ в мембранной системе оказался комплекс Eu³⁺-тетрациклин, усиливающий сверхслабое свечение более чем на три порядка. Была также изучена возможность применения лазерных красителей – производных кумарина – в качестве селективных сенсибилизаторов ХЛ для исследования ферроиндуцированного ПОЛ [11]. Многие из этих соединений оказались эффективными сенсибилизаторами ХЛ на стадиях «быстрой вспышки», латентного периода и «медленной вспышки», но при этом практически не оказывали влияния на стадии стационарного свечения. Из этого можно сделать вывод о том, что усиление ХЛ наблюдалось только на стадиях кинетики, связанных с реакциями цепного окисления липидов. Самым сильным эффектом обладало соединение К-525, которое при концентрации 16 мкмоль усиливало амплитуду медленной вспышки в 1670 раз. Другие соединения этой группы также значительно усиливали ферроиндуцированную ХЛ. Результаты анализа физико-химических параметров соединений хинолизинового цикла свидетельствуют о том, что эффективность сенсибилизации усиливается с увеличением длины волны максимума в спектре поглощения и коэффициента экстинкции активатора. Таким образом, скрининг данных активаторов ХЛ показал, что наиболее активные соединения этого ряда усиливают ХЛ более чем на три порядка и, кроме того, не вносят искажений в изучаемые реакции ПОЛ [11].

Отмеченный выше люминол применяют в следующих случаях. Во-первых, когда собственная ХЛ исследуемой системы находится ниже порога чувствительности измерительной установки. Во-вторых, когда необходимо обнаружить появление радикалов в водных фазах на фоне радикалов различных типов. В-третьих, когда необходимо снизить количество экспериментального материала, например при изучении ХЛ лейкоцитов крови в клинической диагностике. В этом случае удается резко снизить количество крови для анализа и даже работать на цельной крови, без выделения клеток. Механизм действия люминола основан на двухступенчатом свободнорадикальном оксигенировании активатора в реакциях с водными радикалами (*OH и O_2^-). Возбужденный продукт излучает в синей области спектра. Химический зонд люцигенин, как и люминол, имеет достаточно высокий и постоянный по величине квантовый выход ХЛ, а также известный спектр эмиссии. Но физико-химические свойства этих соединений заметно отличаются, что дает возможность применять люминол и люцигенин для изучения различных процессов в гетерогенных системах. Люминол относительно растворим в щелочных условиях и мало растворим в воде при нейтральных pH, что позволяет ему связываться с белковыми и липидными компонентами системы. Люцигенин является двухвалентным катионом, поэтому он хорошо растворяется в воде при нейтральных рН и очень устойчив в растворах. Из сказанного следует, что эти химические зонды должны по-разному распределяться в гетерогенной системе и по-разному активировать в ней ХЛ.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ БИОЭФФЕКТОВ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО МЕТОДА

Рассмотрим примеры использования ХЛ-метода при изучении механизмов биологического действия излучений СВЧ- и КВЧ-диапазона.

Исследование активности лейкоцитов после облучения в КВЧ-диапазоне при разных частотах было выполнено путем измерения ХЛ, стимулированной BaSO₄ в присутствии люминола [12]. Образцы обогащенной лейкоцитами плазмы крови больных людей облучали в течение 30 мин при комнатной температуре на фиксированных частотах 42,19; 46,84 и 53,53 ГГц в режиме частотной модуляции ± 100 МГц. Плотность падающей мощности составляла 1 мВт/см². В качестве измерителя сверхслабого свечения применялся портативный хемилюминометр ПХЛ-01 со спектральной чувствительностью в диапазоне 116...600 нм. Для оценки интенсивности ХЛ суспензии лимфоцитов использовался максимум «медленной вспышки» кинетической кривой ХЛ. Экспериментальные результаты, полученные в данном исследовании, показали разнонаправленное изменение иммунной активности лейкоцитов в зависимости от частоты облучения и состояния организма донора. Авторы данной работы делают вывод об иммуномодулирующем характере КВЧоблучения, индивидуальном для каждого организма [12].

В работе [13] изучался механизм ингибирующего действия излучения КВЧ-диапазона на продукцию активных форм кислорода иммунными клетками (перитонеальными нейтрофилами крови мышей линии NMRI) в синергической реакции калиевого ионофора A23187 и форболового эфира. Продукция активных форм кислорода оценивалась по люминолзависимой ХЛ с помощью хемилюминометра ХЛ-111, разработанного и изготовленного в лаборатории биофизики нервной клетки Института биофизики клетки РАН. В каждом опыте суммарную продукцию активных форм кислорода оценивали по величине площади под кинетической кривой ХЛ. Частота КВЧ-облучения составляла 41,95 ГГц при плотности потока поглощенной мощности 150 мкВт/см² в дальней зоне желобковой антенны (время облучения – 20 мин). В бескальциевой среде во всем диапазоне исследуемых концентраций ионофора эффект КВЧоблучения не наблюдался. На основании этого факта было выдвинуто предположение о том, что наблюдаемый эффект микроволнового облучения на ингибирование продукции активных форм кислорода нейтрофилами определяется входом внеклеточного Ca²⁺ и последующей активацией протеинкиназы С. Полученный эффект, как предполагают авторы публикации [13], может быть следствием усиления деградации фосфолипидов клеточной мембраны и изменения сродства ферментов для ионов Са²⁺.

Изучалось влияние модулированного излучения КВЧ-диапазона в дальней и ближней зонах желобкового облучателя на активацию перитонеальных нейтрофилов опсонизированным зимозаном с помощью ХЛ-измерений [14]. Длительность микроволнового облучения составляла 40 мин, а затем суспензия нейтрофилов активировалась зимозаном. Были получены разнонаправленные эффекты микроволнового излучения при определенных несущих и модулирующих частотах. Анализ полученных результатов позволил авторам данной работы предположить, что пути трансдукции внутриклеточных сигналов при активации респираторного взрыва нейтрофилов в синергической реакции калиевого ионофора A23187 и форболового эфира избирательны не только к несущей частоте микроволнового излучения, но и к частоте импульсной модуляции [14]. Этим же коллективом авторов были продолжены ХЛ-исследования продукции активных форм кислорода перитонеальными нейтрофилами крови лабораторных мышей в условиях КВЧ-облучения и действия слабого постоянного магнитного поля [15]. Экспериментальные результаты показали, что структура электромагнитных полей и фоновые условия, к которым относится и величина постоянного магнитного поля, могут существенно изменять баланс систем внутриклеточной сигнализации, приводя к модификации эффектов микроволнового излучения от изменения направления эффекта вплоть до его исчезновения на выделенных «резонансных» частотах [15].

Известно, что активные формы кислорода (АФК) при достаточно низких концентрациях могут оказывать многостороннее регуляторное действие на биохимические процессы и в связи с этим рассматриваться как система межклеточных и внутриклеточных мессенджеров. С этих позиций изучалась динамика образования АФК в водных растворах в условиях микроволнового облучения [16]. В качестве АФК регистрировался пероксид-анион (H₂O₂) в диапазоне концентраций 10⁻⁶...10⁻⁸ моль ХЛ-методом в присутствии люминола, пероксидазы и параиодфенола. Условия регистрации образования АФК с помощью измерения ХЛ были представлены в работе [17]. Микроволновое облучение растворов в объеме 5 мл проводили в кювете, отстоящей от рупора на 50 мм. Частота облучения составляла 41 ГГц, а плотность падающей мощности – 0,5 мВт/см². В эксперименте без микроволнового облучения (контроль) введение пероксидазы вызывало некоторое увеличение амплитуды «медленной вспышки» ХЛ, значение которой увеличивалось при добавлении в раствор параиодфенола. После микроволнового облучения интенсивность ХЛ в ответ на введение пероксидазы увеличивалась в 2-3 раза независимо от того, вводилась или нет добавка параиодфенола. При действии на облученный раствор каталазы, разлагающей H2O2, наблюдалось падение XЛ до контрольного уровня, что свидетельствовало о связи наблюдаемого эффекта микроволнового облучения с образованием в водном растворе перекиси водорода. Авторы данной работы связывали появление в облученном растворе АФК с изменением структурно-динамического состояния воды, содержащей кластеры ассоциированных молекул воды, соединенных водородными связями [16]. Среди возможных причин наблюдаемого действия микроволн можно называть также известные явления образования конвективного движения воды и локальных колебаний температуры [18, 19], которые могут приводить к увеличению концентрации кислорода, что, в свою очередь, способствует увеличению скорости образования АФК в водном растворе.

Продолжение данных исследований с помощью ХЛ-метода [20] позволило обнаружить, что в буферном физиологическом растворе после облучения при длине волны 8 мм образуются микромолярные концентрации H_2O_2 и некоторые неидентифицированные активные продукты соединений кислорода, которые совместно ингибируют активность супероксиддисмутазы и, таким образом, влияют на функционирование многих ферментативных систем. Интенсивность ХЛ измерялась в данных экспериментах с помощью фотоумножителя и счетчика импульсов при регистрации на мониторе прибора «Люцифер 02 М». Супероксиддисмутаза – фермент, активируемый донорами электронов и ингибируемый акцепторами, был выбран для обнаружения в облученном растворе изменений концентрации перекиси водорода. Как и в предыдущем случае, добавление в облученную среду каталазы снижало уровень эффекта, что свидетельствует о наличии в водном растворе АФК. Наблюдаемый эффект микроволнового излучения был воспроизведен в этой работе добавлением к необлученному раствору экзогенной перекиси водорода в концентрации 3 мкмоль, который также снимался действием каталазы [20]. Возможный механизм наблюдаемого эффекта образования перекиси водорода при микроволновом облучении был предложен в работе [21]. Более интенсивная ротация диполей воды под действием излучения СВЧ-диапазона может вызвать разрыв внутримолекулярных связей с последующим образованием АФК, в том числе и H_2O_2 , в ходе радикальных реакций. Этот вывод подтверждается сильной зависимостью увеличения концентрации H_2O_2 от частоты СВЧизлучения. Если при облучении воды в течение одного часа с мощностью десятки милливатт и частотой 10 ГГц образовывалось 10 нмоль перекиси водорода, то для получения такого же эффекта при частоте 2,5 ГГц необходима была мощность на два порядка выше, приблизительно 500 Вт [21]. Сравнение этих данных с результатами экспериментов вышеприведенных публикаций [16, 20] показывает, что при микроволновом облучении водного раствора с частотой 42 ГГц наблюдается еще более значительный выход H_2O_2 . Авторы этих работ предполагают, что в результате ускорения ротации диполей воды с некоторой вероятностью возникает ионизация последних, по механизму ионизации трением.

В нашей работе [22] изучалось влияние микроволнового излучения в диапазоне КВЧ на скорость накопления продуктов перекисного окисления ненасыщенных жирных кислот, входящих в состав молекул фосфолипидов.

Использовались различные способы инициирования ПОЛ: УФ-облучение, добавление железоаскорбатной смеси, автоокисление, фотоокисление. Скорость ПОЛ определялась с помощью реакций с 2-тиобарбитуровой кислотой и УФ-спектроскопии, а также путем регистрации сверхслабого свечения (ХЛ). Для этого был разработан, сконструирован и изготовлен в нашей лаборатории хемилюминометр на основе фотоумножителя ФЭУ-100 с областью спектральной чувствительности 170...830 нм, один из вариантов которого представлен в работе [23]. Калибровка чувствительности прибора производилась по стандартному источнику свечения – урановому стеклу ЖС-19. Соотношение сигнал/шум для наиболее слабых световых сигналов было не хуже 1/10.

Во всех наших опытах микроволновое облучение приводило к ускорению процессов ПОЛ. Все три способа инициирования ПОЛ оказались достаточно эффективны, и уже через 15 мин протекания железоаскорбатного или фотохимического окисления концентрация продуктов возрастала в несколько раз. Эффект достигал 20 %. Следует обратить внимание на то, что увеличение содержания продуктов ПОЛ в образцах, облучаемых микроволнами, отчетливо наблюдалось уже при плотностях мощности падающего на объект излучения не более 1 мВт/см². При плотностях меньше 0,2 мВт/см² ускорения биохимических реакций выявить не удавалось. Следует также отметить, что эффект КВЧ-излучения наблюдался при всех исследованных длинах волн (8,5...4,0 мм). На рис. 2 представлен пример зарегистрированного в наших экспериментах сверхслабого свечения продуктов ПОЛ в результате облучения видимым светом суспензии липосом в присутствии метиленового синего в условиях микроволнового облучения и без облучения микроволнами. В данном случае измеряли концентрацию гидроперекисей в суспензии липосом, которую разводили в буферном растворе в соотношении 1:3, и регистрировали величину «быстрой вспышки» ХЛ после введения избытка ферроионов (10-3 моль) при интенсивном перемешивании. При данном способе измерения амплитуда «быстрой вспышки» пропорциональна квадрату концентрации гидроперекисей ненасыщенных жирных кислот, содержащихся в образце [24].

Следует отметить, что для получения количественных характеристик изучаемых процессов необходимо сопоставлять данные, полученные ХЛ-методом, с данными каких-либо прямых



Рис. 2. Динамика накопления продуктов ПОЛ в липосомах – контрольных (2) и облученных микроволнами (1) образцах при инициировании реакции облучением видимым светом в присутствии сенсибилизатора (метиленового синего). Длина волны микроволнового облучения – 8,5 мм, плотность падающей мощности – 0, 33 мВт/см². I_{xn} – амплитуда быстрой вспышки ХЛ после введения в образец избытка ионов Fe²⁺ (10⁻³ моль)

методов контроля этих биохимических процессов. Для иллюстрации такого подхода на рис. 3 приводится сравнение ХЛ-регистрации продуктов ПОЛ в суспензии липосом (рис. 3,*в*) с методом, использующим реакции с 2-тиобарбитуровой кислотой (рис. 3,*a*), а также по увеличению максимумов спектра поглощения продуктов ПОЛ на длинах волн 233 и 268 нм (рис. 3,*б*).

При изучении электрического пробоя модельных биологических мембран мы использовали ХЛ-методы регистрации свободных радикалов, которые, по нашему мнению, должны были бы сопровождать эти процессы в нативных клетках.

Электрический пробой биологических мембран – это нарушение барьерной функции мембраны, которое обычно определяют по входу или выходу из клетки важных биологических веществ. Электрический пробой все чаще используют как метод введения в клетки лекарственных веществ, а также для изучения клеточной физиологии.

В работах [7, 8] впервые изучалось нарушение барьерных функций мембран при пробое с использованием измерения ХЛ вовне или во внутриклеточном пространстве. В качестве объекта исследования использовалась суспензия лейкоцитов (нейтрофилов или макрофагов) крови человека, в которой были обнаружены признаки электроактивации высоковольтными импульсами электрического поля микросекундной длительности.

Нам удалось экспериментально подтвердить, что нейтрофилы и макрофаги крови человека отвечают вспышкой ХЛ на действие одиночного импульса электрического поля высокой напряженности [8]. Там же представлена кинетическая кривая люминолзависимой ХЛ суспензии



Рис. 3. Определение продуктов реакций ПОЛ в суспензии липосом с помощью реакции с 2-тиобарбитуровой кислотой по измерению максимума спектра поглощения 535 нм (*a*), по измерению максимумов 233 нм (гидроперекиси) и 270 нм (конечные продукты ПОЛ) в спектре поглощения продуктов окисления липидов в УФ-области (*б*) и по временной зависимости ХЛ (амплитуда «быстрой вспышки») липосом в ответ на добавление ионов железа (*в*):

1 и 2 – липосомы до и после активации ПОЛ ультрафиолетовым светом

лейкоцитов при воздействии электрического импульса. Хемилюминесцентный ответ клеток имеет достаточно сложную форму. На характерной кривой можно выделить не менее трех фаз.

Первая фаза ХЛ-ответа – «сверхбыстрая вспышка», которая развивается за 1...2 с, практически не зависит от присутствия клеток в водном растворе, пропорциональна амплитуде импульса и обусловлена электрохемилюминесценцией раствора.

Вторая фаза – «быстрая вспышка», максимум которой развивается через 10...15 с, отличается относительно небольшой амплитудой. Ее выраженность сильно зависит от условий эксперимента. Так, при больших амплитудах электрического импульса может наблюдаться отсутствие «быстрой вспышки» и даже кратковременное угнетение свечения.

Третья фаза – «медленная вспышка» ХЛ-клеток, максимум которой развивается через 1,5...2 мин после действия электрического импульса. Этот участок кривой является наиболее выраженным, информативным и хорошо воспроизводимым ответом клеток на воздействие электрического поля. При наиболее оптимальных условиях электроактивации максимальная амплитуда «медленной вспышки» сравнима с величиной ХЛ-ответа клеток на добавление зимозана – вещества, традиционно используемого в хемилюминесцентных медико-биологических исследованиях.

Для количественных оценок активации нейтрофилов и макрофагов была выбрана не абсолютная величина ХЛ-свечения, а отношение максимального приращения медленной вспышки над уровнем спонтанного свечения клеток к величине этого уровня (см. рис. 1). Этот параметр мы назвали степенью активации нейтрофилов ($I_{\rm akt} / I_{\rm cn}$).

Результаты наших экспериментов показали, что именно этот параметр дает наиболее воспроизводимые результаты, т. к. позволяет уменьшить погрешность измерений, связанную с изменением функциональной активности клеток в условиях длительного эксперимента, а также неточностью дозировки клеток и люминола в каждом отдельном опыте.

Облучение на длине волны 7,9 мм при плотности падающей мощности 5 мВт/см² после пробоя клеток снижало величину ХЛ-ответа клеток на 15...20 %, что свидетельствовало о пере-

стройке мембран, которая приводила к закрыванию пор, образовавшихся при электрическом пробое мембран. Анализ температурной зависимости ХЛответа на пробой иммунных клеток показал (рис. 4), что максимальная активность клеток соответствует физиологической температуре; при дальнейшем повышении температуры суспензии клеток происходит снижение ХЛответа, что указывает на закрывание, «залечивание» пор в клеточных мембранах. Данное заключение было сделано нами в соответствии с выводами работы [25], посвященной изучению модификации пор в мембранах эритроцитов при КВЧ-облучении.



Рис. 4. Влияние температуры на хемилюминесцентный ответ суспензии макрофагов. Стрелкой указан момент подачи импульса электрического поля с амплитудой напряженности 2 кВ/см

3. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ХЕМИЛЮМИНОМЕТРА

Рассмотрим некоторые особенности хемилюминометра – измерительного прибора, разработанного при участии авторов данной статьи, для исследований биологического действия микроволн*. Основным узлом хемилюминометра является светонепроницаемая кюветная камера (рис. 5), в которую помещается термостатируемая кювета с прозрачным дном и одной плоской прозрачной стенкой для подведения микроволнового излучателя к исследуемому образцу. Кювета снабжена стеклянной мешалкой, закрепленной на оси электродвигателя с частотой вращения от 1 до 10³ об/мин, и капиллярной трубкой для введения добавок. Светоизолирующая шторка, расположенная между дном кюветы и фотоэлектронным умножителем (ФЭУ), предохраняет последний от засветки при открывании крышки светонепроницаемой камеры и связана с блокировкой высоковольтного источника питания ФЭУ. В кюветном отделении предусмотрена возможность электрообработки, диэлектрических и электрометрических измерений образцов. Это обстоятельство определило прямоугольную форму кюветы и наличие пары плоских электродов, покрытых инертным металлом (Au, Pt). Предусмотрена также возможность оценки спектрального распределения ХЛ с помощью граничных абсорбционных фильтров, помещенных под прозрачным дном кюветы. Измерительное устройство снабжено усилителем анодного сигнала ФЭУ, схемой формирования стандартных импульсов для логических цифровых устройств, автоматической обработки данных измерений и сопряжения с компьютером. Основные наши усилия были направлены на разработку кюветного отделения хемилюминометра, как наиболее оригинального узла прибора, соответствующего новым подходам к методике измерения ХЛ и возможности микроволнового облучения образца в процессе измерений.

Геометрические размеры кюветы определялись условиями перемешивания пробы небольшого объема и максимального сбора света на фотокатод умножителя для пороговых световых потоков в широком оптическом диапазоне (200...800 нм). Исходя из размеров фотокатода (диаметр – 14 мм), возможностей фокусирующей системы, объема пробы и вводимых добавок, была предложена прямоугольная кювета с шириной боковых граней 16 мм и высотой 30 мм, толщиной стенок и дна соответственно 1,5 и 2 мм. Измерения показали, что плоское дно кюветы из плавленого кварца ослабляет световой поток не более чем на 10 %. С учетом же ослабления ХЛ на расстоянии 20 мм от фотокатода ФЭУ светосбор со дна кюветы составляет 20...30 % от интенсивности, измеренной при непосредственном контакте дна кюветы и оптического входа ФЭУ.

Кювета термостатируется с помощью теплопроводящих медных пластин, служащих одновременно электродами для электрообработки образца (рис. 6). Заданная температура пластин термостата поддерживается с помощью специально разработанного полупроводникового термостатирующего устройства. Принцип его работы основан на автоматическом регулировании коллекторного тока транзистора, выполняющего роль нагревательного элемента, который плотно закреплен на плоской посадочной пластине термостата. Регулирующий сигнал формируется изменением напряжения *p-n*-перехода «измерительного транзистора», вызванного изменением температуры термостатируемого объекта. Эти изменения напряжения усиливаются дифференциальным усилителем и подаются на стабилитрон, выполняющий функции порогового устройства. Сигнал с порогового устройства регулирует коллекторный ток «нагревательного транзистора».

^{*}Измерения хемилюминесценции в проведенных исследованиях были выполнены В.С. Шаровым и В.С. Малининым.



Рис. 5. Кюветное отделение хемилюминометра:

1 – корпус камеры; 2 – крышка; 3 – кожух ФЭУ; 4 – двигатель мешалки; 5 – муфта; 6 – стеклянная мешалка; 7 – светонепроницаемый экран; 8 – стеклянная пластина; 9 – опорное кольцо; 10 – металлическая шторка; 11 – светоизолирующие резиновые прокладки; 12 – рычаг управления шторкой; 13 – ось шторки; 14 – светофильтр; 15 – волновод; 16 – светонепроницаемая диэлектрическая вставка; 17 – металлическая трубка-штуцер (кожух капиллярной трубки для введения добавок)





1 – прямоугольная кювета из оргстекла; 2 – стеклянная мешалка;
3 – позолоченные электроды; 4 – «измерительный» и «нагревательный» транзисторы термостата

С целью предотвращения перегрева ФЭУ (путем теплопередачи от термостатированной ячейки) предусмотрен тепловой экран, который создает также светоизоляцию кюветной камеры. Удаление отработанного образца и промывающей жидкости осуществляется без извлечения кюветы из измерительного прибора, с помощью трубки с наконечником, соединенной с водоструйным насосом.

Основные требования к устройству для введения добавок в кювету: надежная светоизоляция, возможность быстрого (около 1 с) введения добавки и точность дозировки. Первое требование легко удовлетворить, используя для введения достаточно длинную капиллярную трубку (кембрик) из непрозрачного материала, один конец которой погружен в кювету, а другой – через штуцер выведен наружу. Для повышения надежности светоизоляции и фиксации конца капилляра над кюветой использовали направляющую трубку из черненой меди в форме 1,5...2 витков спирали, сходящейся к оси мешалки. Направляющая трубка припаивается к крышке кюветной камеры. Для дозировки и введения добавок была разработана малогабаритная насадка на крышку кюветного отделения, состоящая из приемной фторопластовой камеры, соединенной с подводящей трубкой тонким фторопластовым капилляром, и поршня с отверстием для введения добавки (рис. 7). Добавка удерживается в приемной камере за счет капиллярных сил (при объеме добавок не более 0,5 мл). Введение добавки в кювету производится нажатием на поршень до упора (при этом палец плотно закрывает отверстие в поршне, как при работе со стеклянными пипетками). Обратный ход поршня обеспечивает пружина, герметичность системы – резиновая прокладка (сальник). Устройство монтируется на крышке кюветной камеры, напротив отверстия для подводящей трубки. Светоизоляцию создает круглая прокладка из тонкой (0,5...1 мм) черной резины.

Рис. 7. Устройство для введения добавок в кювету: 1 – корпус приемной камеры; 2 – поршень; 3 – пружина; 4 – уплотнительные резиновые кольца; 5 – светоизолирующая прокладка; 6 – крышка кюветной камеры; 7 – направляющая трубка



Необходимость перемешивания содержимого кюветы вызвана несколькими причинами: 1) для равномерного распределения добавок; 2) для аэрации раствора, т. е. насыщения его или суспензии клеток атмосферным кислородом, который интенсивно расходуется в реакциях; 3) гетерогенностью системы (биохимическая реакция идет локально в липидной фазе, составляющей 0,001 часть пробы по объему, а кислород и железо распределены по всей суспензии). В нашем устройстве использовался традиционный вариант механической мешалки, состоящей из электродвигателя постоянного тока и стеклянной лопаточки, соединенной с помощью муфты с осью двигателя (см. рис. 5). Длина стеклянной мешалки выбрана такой, чтобы до дна кюветы оставалось 2...3 мм. Электродвигатель монтируется на крышке кюветной камеры и прикрывается металлическим экраном, который, с одной стороны, обеспечивает светоизоляцию, а с другой – служит ручкой для манипуляций с крышкой камеры. Стеклянную мешалку промывают после измерения каждой пробы, накрывая крышкой камеры стакан с чистой дистиллированной водой и включая на 5...10 с двигатель мешалки. Экспериментально исследовалось влияние скорости перемешивания на интенсивность и кинетику «быстрой вспышки» ХЛ после введения Fe²⁺ (до конечной концентрации 0,2·10⁻³ моль) в суспензии окисленных липосом. При вращении мешалки со скоростью 600 об/мин небольшие изменения режима перемешивания практически не сказываются на параметрах кинетики ХЛ.

Измеренная в этих условиях кинетика «быстрой вспышки» позволила определить временное разрешение нашей установки – приблизительно 0,5 с. За это время, по всей видимости, происходит полное перемешивание раствора.

Также оценивалась воспроизводимость кинетики более медленного процесса – развития «медленной вспышки» ХЛ. Величина латентного периода, по данным двадцати экспериментов, составила (12,0±0,25) мин. Разброс временных параметров – около 4 %. Максимальная интенсивность медленной вспышки – (560±15) отн. ед., т. е. разброс по интенсивности составлял около 6 %.

Для облегчения светоизоляции кюветной камеры были предусмотрены соответствующие пазы и выступы на крышке и корпусе камеры, покрытые черной окисной пленкой. Выступ на крышке камеры используется для механической блокировки шторки ФЭУ, предохраняющей детектор от попадания света внешних источников. При снятии крышки одновременно срабатывает и микропереключатель электронной блокировки ФЭУ по высокому напряжению (электронную часть прибора мы в этой публикации не рассматриваем), что повышает систему защиты фотодетектора. В основе конструкции шторки лежит система из двух фотозатворов со спаренным управлением, расположенных между дном камеры и экраном. Управление шторкой осуществляется с помощью стандартного тросика, ввинченного в гнездо фотозатвора и соединенного со шторкой системы блокировки так, что открытие шторки возможно лишь при закрытой крышке кюветной камеры. Один из типичных примеров использования хемилюминометра ХЛМ-3, разработанного и изготовленного в ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, представлен в работе, посвященной изучению природы радикалов, образующихся при гипохлорит-индуцированном ПОЛ [26].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, приведенные в данном обзоре данные об использовании хемилюминесцентного метода контроля состояния объекта при изучении биологических эффектов микроволнового излучения показывают его перспективность в случае анализа процессов перекисного окисления липидов и других реакций, связанных с участием активных форм кислорода и пероксидов. Предложена инициация ХЛ клеток как с помощью химических добавок, так и путем импульсной электрической обработки, которая имеет ряд технологических и принципиальных преимуществ. Применение химических и физических усилителей ХЛ позволяет использовать минимальное количество образца для измерения ХЛ и осуществлять разделение ХЛ, обусловленной ХЛ-реакциями водных радикалов, и ХЛ при перекисном окислении липидов. Предложена конструкция лабораторного хемилюминометра, позволяющего проводить измерения ХЛ одновременно с электрообработкой и механическим перемешиванием образца, микроволновым облучением его, введением добавок в изучаемую систему и ее термостатированием.

ЛИТЕРАТУРА

^{1.} Девятков Н.Д. Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона волн на биологические объекты // Успехи физических наук. – 1973. – Т. 110, вып. 3. – С. 453-455.

^{2.} Девятков Н.Д., Бецкий О.В. Обзор работ, выполненных за 10-15 лет, по применению миллиметрового излучения низкой интенсивности в медицине // Клиническая медицина. – 1986. – № 6. – С. 102-105.

^{3.} *Казаринов К.Д.* Биологические эффекты КВЧ-излучения низкой интенсивности // Итоги науки и техники. Сер. Биофизика. – 1990. – Т. 27. – 102 с.
4. Владимиров Ю.А. Свечение, сопровождающее биохимические реакции // Соровский образовательный журнал. – 1999. – № 6. – С. 25-32.

5. Взаимодействие гипохлорита с гидропероксидом жирной кислоты приводит к образованию свободных радикалов /*А.В. Чеканов, О.М. Панасенко, А.Н. Осипов, К.Д. Казаринов* и др. // Биофизика. – 2005. – Т. 50, вып. 1. – С. 13-19.

6. Тушение противовоспалительными препаратами ХЛ нейтрофилов крови человека, активированных высоковольтными импульсами электрического поля / К.Д. Казаринов, Е.А. Тимошина, А.Н. Осипов, В.С. Малинин, А.В. Путвинский // Препринт ИРЭ РАН. – 1994. – № 11(599). – 16 с.

7. Казаринов К.Д., Малинин В.С., Путвинский А.В. Определение фагоцитарной активности нейтрофилов человека в микрообъёмах цельной крови // Препринт ИРЭ РАН. – 1993. – № 6(588). – 12 с.

8. *Малинин В.С., Казаринов К.Д., Путвинский А.В.* Механизм активации нейтрофилов крови человека импульсами электрического поля // Биофизика. – 1996. – Т. 41, вып. 4. – С. 876-886.

9. Шаров В.С., Владимиров Ю.А. Хемилюминесценция липосом, активированная редкоземельными ионами // Биофизика. – 1982. – Т. 27, вып. 2. – С. 327-329.

10. Шаров В.С., Суслова Т.Б., Владимиров Ю.А. Изучение вклада липидных и водных радикалов в хемилюминесценцию при перекисном окислении липидов с помощью редкоземельных активаторов // Тезисы докладов I Всесоюзного биофизического съезда. – М.: МГУ. – 1982. – Т. 3. – С. 161-162.

11. Intrinsic and enhanced chemiluminescence accompanying lipid peroxidation / V.S. Sharov, E.S. Driomina, A.V. Putvinsky, Yu.A. Vladimirov // Journal of Bioluminescence and Chemiluminescence. – 1991. – Vol. 6, No 4. – P. 282.

12. Исследование хемилюминесценции лейкоцитов крови человека после воздействия низкоинтенсивного электромагнитного поля крайне высокой частоты / Д.Г. Мудрик, М.Б. Голант, В.Е. Извольская и др. // Миллиметровые волны в медицине и биологии: Доклады 10-го Российского симпозиума. – М.: ИРЭ РАН, 1995. – С. 109-111.

13. Миллиметровые волны ингибируют синергический эффект кальциевого ионофора A23187 и форболового эфира в активации респираторного взрыва нейтрофилов / А.Б. Сафронова, А.Б. Гапеев, А.А. Аловская, А.Г. Габдулхакова, Н.К. Чемерис, Е.Е. Фесенко // Биофизика. – 1997. – Т. 42, вып. 6. – С. 1267-1273.

14. Гапеев А.Б., Чемерис Н.К. // Вестник новых медицинских технологий. – 2000. – Т. 7, № 1. – С. 20-25.

15. Гапеев А.Б., Якушина В.С., Чемерис Н.К., Фесенко Е.Е. Зависимость эффектов ЭМИ КВЧ от величины постоянного магнитного поля // Доклады РАН. – 1999. – Т. 369, № 3. – С. 404-407.

16. Образование реактивных форм кислорода в водных растворах под действием электромагнитного излучения КВЧ-диапазона / *М. Поцелуева, А.В. Пустовидко, Ю.В. Евтодиенко, Р.Н. Храмов, Л.М. Чайлахян* // Доклады академии наук. – 1998. – Т. 359, № 3. – С. 415-418.

17. Условия оптимальной продукции активных форм кислорода полиморфноядерными лейкоцитами крысы / М.М. Поцелуева, Э.А. Чухлова, Б.И. Медведев, Ю.В. Евтодиенко // Биофизика. – 1995. – Т. 40, вып. 6. – С. 1259-1264.

18. *Khizhnjak E.P., Ziskin C.* Temperature oscillation in liquid media caused by continuous (nonmodulated) millimeter wavelength electromagnetic irradiation // Bioelectromagnetics. – 1996. – Vol. 17. – P. 223-229.

19. *Kazarinov K.D., Putvinsky A.V., Malinin V.S.* Interface convection in water as a primary mechanism of extra high frequency irradiation // Electricity and Magnetism in Biology and Medicine: Plenum publishing corporation, N.Y. – 1999. – P. 441-444.

20. *Маринов Б.С., Чайлахян Л.М.* Регуляция активности супероксиддисмутазы сверхвысокочастотным излучением. Механизм действия СВЧ // Доклады академии наук. – 1997. – Т. 357, № 6. – С. 821-824.

21. Диссоциация воды под действием СВЧ излучения / В.Л. Вакс, Г.А. Домрачев, Ю.Л. Родыгин, Д.А. Селивановский, Е.И. Спивак // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 1994. – Т. 37, № 1. – С. 149-154.

22. Ускорение перекисного окисления липидов в липосомах под действием мм-излучения / В.Е. Андреев, О.В. Бецкий, С.А. Ильина, К.Д. Казаринов, А.В. Путвинский, В.С. Шаров // Нетепловые эффекты мм-излучения: сб. докл. – М.: ИРЭ АН СССР, 1981. – С.167-176.

23. Хемилюминометр / В.А. Казаманов, В.С. Шаров, А.В. Путвинский, К.Д. Казаринов // Приборы и техника эксперимента. – 1989. – № 1. – С. 243-244.

24. *Петренко Ю.М., Рощупкин Д.И., Владимиров Ю.А*. Кинетика взаимодействия закисного железа с окисленными липидами и возможность хемилюминесцентного определения гидроперекисей // Биофизика. – 1975. – Т. 20, вып. 4. – С. 608-611.

25. Влияние миллиметрового излучения низкой интенсивности на ионную проницаемость мембран эритроцитов / *Н.Д. Девятков, О.В. Бецкий, С.А. Ильина, А.В. Путвинский*; под ред. *Н.Д. Девяткова* // Сб. научных трудов. – М.: АН СССР, ИРЭ, 1983. – С. 78-96.

26. Взаимодействие трет-бутилгидропероксида с гипохлоритом приводит к образованию перекисных радикалов. Исследование методом хемилюминесценции /*А.В. Чеканов, О.М. Панасенко, А.Н. Осипов, Ю. Арнхольд, К.Д. Казаринов* и др. // Биофизика. – 2002. – Т. 47, вып. 5. – С. 787-794.

Статья поступила 17 июня 2009 г.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ СБОРНИКЕ «СВЧ-ТЕХНИКА»

1. Статья должна иметь официальное направление от учреждения, в котором выполнена работа, и документ, подтверждающий возможность открытого публикования (акт экспертизы).

- 2. Статья должна содержать:
- соответствующий индекс универсальной десятичной классификации литературы (УДК);
- инициалы и фамилии авторов;
- название;
- реферат;
- ключевые слова;
- текст статьи;
- список литературы;

· краткие сведения об авторах, включающие фамилию, имя, отчество (полностью), город, место работы, домашний и электронный адрес, телефон.

Объем публикуемой статьи, как правило, до 12 стр., включая иллюстрации.

3. Статья должна быть подготовлена в текстовом редакторе MS Word для Windows и передана в виде файла (формат DOC или RTF), записанного на магнитном (FDD 3,5") или оптическом (CD) носителе, и двух экземпляров распечатки.

4. Статья должна быть сформатирована через 1 интервал с выравниванием по ширине. Абзацный отступ – 0,7 см. При наборе текста используются только стандартные True Type шрифты – Times New Roman и Symbol. Размер шрифта основного текста – 12 пунктов, примечаний и ссылок – 10 пунктов. Устанавливаемый размер бумаги – А4 (210 × 297 мм).

Сложные формулы набираются только в "Редакторе формул" Word. Непосредственно в Worde допускается использование только простых формул (символы с индексами, подстрочными и/или надстрочными). Не принимаются формулы, выполненные в виде рисунков. Расшифровка буквенных обозначений формул в тексте должна быть набрана в текстовом редакторе. Таблицы выполняются в формате Word.

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

растровые рисунки – в формате TIFF, разрешение 300 точек/дюйм (для полутоновых фотографий допускается формат JPEG, для рисунков – формат GIF); векторная графика – в формате CorelDRAW, WMF;
размер рисунка – не более 17 × 20 см;

• буквенные и цифровые обозначения на рисунках должны соответствовать обозначениям в тексте, причем начертание греческих и русских букв – прямое, а латинских букв и цифр, обозначающих номера позиций, – курсивное;

• текстовая информация, не являющаяся неотъемлемой частью рисунка, и условные обозначения выносятся в текст статьи или в подпись к рисунку.

Фотографии принимаются в оригиналах (не более 18 × 24 см) или в электронном виде.

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

6. Следует строго соблюдать единообразие терминов, размерностей, условных обозначений, сокращений. Единицы измерения должны соответствовать системе СИ.

7. Формулы следует нумеровать в круглых скобках, например (2), литературные ссылки – в прямых, например [2], подстрочные замечания отмечаются звездочками *.

8. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Все слова в заголовках граф даются без сокращений и в единственном числе.

9. Библиография составляется в соответствии с ГОСТ 7.1 – 2003 и дается общим списком в конце статьи.

10. Итоговое решение об одобрении или отклонении представленных в редакцию материалов принимается редакционной коллегией, о чем авторы ставятся в известность.

11. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

«СВЧ-ТЕХНИКА»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Редактор Хоточкина Л.Н. Компьютерная верстка Земскова Л.А. Коррекция рисунков Лазарева Т.В.

Подписано к печати	Усл. п. л. 9	Формат 60×88 ^{1/8}
21.05.2010 г.	Учизд. л. 9,5	Тираж 500
Заказ № 274	Индекс 36292	6 статей

ФГУП «НПП «Исток» 141190, г.Фрязино, Московская обл., ул.Вокзальная, 2а Тел.: (495)465-86-12. Факс: (495)465-86-12 E-mail: istok-info@flexuser.ru

Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2010, вып. 2(505), с. 1-72

Подписной индекс 36292 в каталоге агентства «Роспечать»