

09;10

## Микроэлектронный автоэмиссионный усилитель со скрещенными полями

© Д.В. Соколов, Д.И. Трубецков

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,  
Государственный учебно-научный центр "Колледж",  
410026 Саратов, Россия

(Поступило в Редакцию 19 октября 1998 г.)

Приводятся результаты теоретического исследования микроэлектронной конструкции двухсекционного СВЧ усилителя со скрещенными полями с распределенным автоэмиссионным катодом.

Технологические достижения, на основе которых в последние десятилетия были созданы различные типы тонкопленочных вакуумных микротриодов с автоэмиссионными катодами, открыли, казалось бы, неограниченные возможности для создания новых сверхминиатюрных усилителей и генераторов СВЧ и миллиметрового диапазона на основе классических триодных схем [1]. По сравнению с твердотельными устройствами такие приборы должны быть более устойчивыми по отношению к радиационным и температурным воздействиям; кроме того, предполагалось, что за счет свободного движения электронов удастся существенно повысить рабочую частоту. Однако оказалось, что достигнутые на сегодня параметры автоэмиссионных триодов совершенно недостаточны для компенсации потерь, которые в микроэлектронных устройствах вследствие малой толщины проводящих пленок значительно выше, чем в обычных. Кроме того, большая входная емкость автоэмиссионного триода настолько ограничивает рабочую частоту, что она оказывается ниже, чем в аналогичных твердотельных приборах. Поэтому естественными оказываются отказ от триодных схем и обращение к устройствам классической СВЧ электроники, основанных на длительном взаимодействии пучка с замедленными волнами. В данной работе рассмотрена возможность реализации такого взаимодействия на примере микроэлектронной модификации усилителя со скрещенными электрическим и магнитным полями, использующего тонкопленочный автоэмиссионный катод. Однако обычная схема такого усилителя [2,3], в которой распределенный автокатод располагается в пространстве взаимодействия напротив замедляющей системы, является не вполне приемлемой для микроэлектронных конструкций. В подобной схеме ток, поступающий с катода в пространство взаимодействия, растет вдоль его длины и, поскольку вначале этот ток невелик, скорость возрастания поля, возбуждаемого пучком, также невелика. Поэтому длина пространства взаимодействия, соответствующая насыщению поля, оказывается такой большой, что затухание, которое, как указывалось выше, в микроэлектронных замедляющих системах значительно больше, чем в обычных, сводит на нет весь эффект усиления. Помимо того, и увеличение длины самого микрокатада крайне нежелатель-

но по технологическим причинам. Более эффективной представляется схема двухсекционного усилителя, когда распределенный автоэмиссионный катод располагается только во входной секции, а в выходной секции на его месте находится плоский проводящий элетрод. Усиливаемый сигнал подается на отрезок замедляющей системы во входной секции. Входная секция, длина которой в этом случае невелика, служит только для формирования электронных ступков. Вылетающие с катода электроны движутся по циклоидам, причем их средняя скорость должна быть близка скорости волны в замедляющей системе. Электроны, находящиеся в ускоряющих фазах электрического поля замедленной волны, опускаются и поглощаются катодом. Электроны, попадающие в тормозящие фазы поля, поднимаются к замедляющей системе. Таким образом, происходит селекция электронов и модуляция электронного потока: электроны, находившиеся в ускоряющих фазах, которые в последующем могли бы отбирать энергию у поля, не участвуют далее в процессе взаимодействия. Следует отметить, что такая селекция происходит при сравнительно малой амплитуде поля, поэтому она почти не зависит от величины затухания во входной секции. Промодулированный электронный поток попадает в выходную секцию и возбуждает поле во второй замедляющей системе. Поскольку во взаимодействии с самого начала участвуют электроны, эмиттируемые со всего катода, то длина пространства взаимодействия, на которой достигается насыщение поля, оказывается значительно меньше соответствующей длины односекционного прибора.

Прежде чем перейти к результатам расчета, остановимся на одной специфической особенности, которая присуща именно микроэлектронной модификации приборов со скрещенными полями. В приборах обычных размеров расстояние между анодом и катодом  $h$  значительно больше циклотронного радиуса вращения электронов и это вращение слабо влияет на процессы взаимодействия. В микроэлектронной конструкции расстояние между анодом и катодом невелико и электрон при своем вращении может сразу попасть на анод, выходя, таким образом, из процесса взаимодействия. Предельные (минимальные значения) значения магнитного поля  $B$  и анодного напряжения  $U_0$ , соответствующих такому попаданию, могут

быть определены из соотношений, которые связывают параметры циклоидального движения со значениями статических полей и предполагают равенство средней скорости пучка со скоростью замедленной волны

$$r = 0.036f/(By), \quad U_0 = 5.11 \cdot 10^5/(rn^2).$$

Здесь  $r = R/h$ ,  $R$  — радиус циклоиды,  $h$  — расстояние между катодом и замедляющей системой,  $f$  — частота в GHz,  $y = \beta h$ ,  $\beta = 2fn/c$ ,  $n$  — замедление,  $c$  — скорость света. Предельные (минимальные значения) значения магнитного поля (при  $y = 4$ ) и анодного напряжения приведены соответственно в табл. 1 и 2. Из табл. 1 следует, что по крайней мере на частотах до 200 GHz предельная величина магнитного поля не выходит за пределы реально достижимых значений. Табл. 2 показывает, что, для того чтобы рассматриваемая микроэлектронная модификация была не слишком высоковольтной, замедление в ней должно быть достаточно большим и существенно превышать замедление обычных СВЧ систем. К счастью, микроэлектронные замедляющие системы, как это следует, например, из [4], вследствие наличия диэлектрической подложки обладают как раз высоким замедлением ( $n \approx 20-80$ ).

Расчет усилителя проводился в двумерном приближении стандартным для СВЧ электроники методом крупных частиц. Распределенный поток с автоэмиссионного катода моделировался набором плоских пусков, координаты вылета которых расположены равномерно вдоль катода. Каждый пучок представлялся совокупностью не взаимодействующих "крупных" частиц-стержней. Для задания параметров замедляющей системы использовались данные работы [4].

Результаты расчета иллюстрируют рис. 1, 2. Рис. 1, на котором представлено распределение коэффициента усиления  $G$  по длине пространства взаимодействия  $l$  для усилителя с одной и с двумя секциями, показывает эффективность введения предварительной модуляции электронного потока. Для выбранного набора параметров она приводит к сокращению длины насыщения поля

Таблица 1.

$f$ , GHz	$B$ , T
10	0.18
50	0.9
100	1.8
200	3.6
400	7.2

Таблица 2.

$n$	$U_0$ , kV
10	10.2
20	2.55
30	1.23
50	0.41

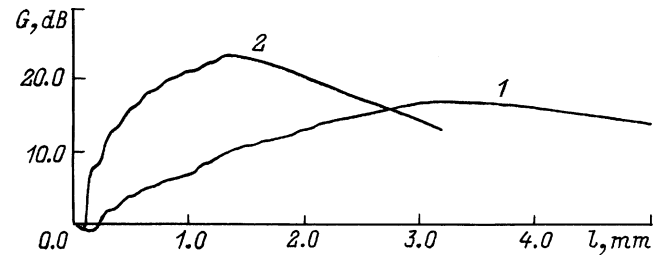


Рис. 1. Распределение коэффициента усиления по длине в односекционном усилителе (1) и в выходной секции двухсекционного усилителя (2) при  $f = 50$  GHz,  $n = 46$ ,  $l_1 = 1$  mm,  $h = 0.04$  mm,  $U_0 = 600$  V,  $B = 2.3$  T.

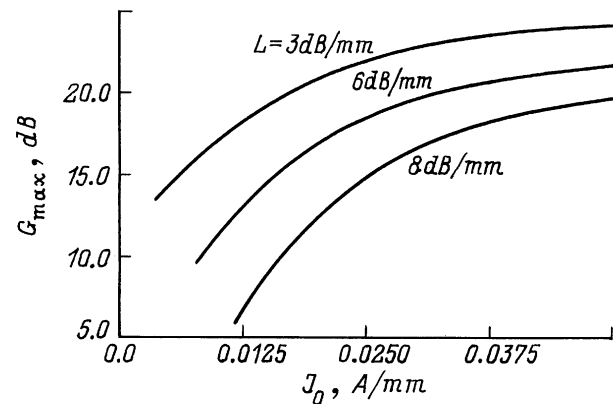


Рис. 2. Зависимость максимального коэффициента усиления от линейной плотности тока автоэмиссионного катода для различных значений параметра потерь в замедляющей системе.

в выходной секции почти в 2.5 раза и увеличению за счет этого максимального коэффициента усиления на 7 dB по сравнению с односекционным прибором. На рис. 2 показана зависимость максимального коэффициента усиления двухсекционного усилителя  $G_{\max}$  от линейной плотности тока автоэмиссионного микрокатода  $J_0$  и параметра потерь  $L$  в замедляющей системе. Существенно, что вполне удовлетворительные значения  $G_{\max}$  достигаются при невысоких значениях параметров микрокатода, которые являются сейчас вполне реальными, и при достаточно больших потерях в замедляющей системе.

Приведенные результаты расчетов, которые имеют, естественно, оценочный характер, указывают на перспективность использования взаимодействия в скрещенных полях для создания микроэлектронных усилителей сантиметрового и миллиметрового диапазонов с автоэмиссионными микрокатадами, параметры которых являются вполне достижимыми на современном уровне развития вакуумной микроэлектроники.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 97-02-16546.

## Список литературы

- [1] *Brodie I., Spindt C.A.* // Adv. in Electron. and Electron Phys. 1992. Vol. 83. P. 1–106.
- [2] *Мурье, Окресс* // Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями. Т. 1. М.: ИЛ, 1961. С. 15–27.
- [3] *Trubetskoy D.I., Sokolov D.V., Rozhnev A.G., Gavrilov M.V.* // Techn. Dig. 6<sup>th</sup> Intern. Vac. Microel. Conf. Newport: Rhode Island, 1993. P. 70–71.
- [4] *Sinitsyn N.I.* et al. // J. Vac. Sci. Technol. B. 1993. Vol. 11 (2). P. 477–480.