

ТРАНСПОРТИРОВКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

ПРИЕМНИК СИСТЕМЫ

А.Галдецкий

Концепция гелиоэлектростанций на ИСЗ* интенсивно исследуется (например, проект SPS-2000 [1–3]). В соответствии с ее положениями мощность на выходе солнечных батарей преобразуется в СВЧ-энергию с помощью эффективных генераторов и передается на Землю по радиолучу. В качестве приемника энергии предлагается эффективный преобразователь СВЧ-мощности в напряжение постоянного тока на основе автоэмиссионного диода.

Сегодня идея транспортировки электроэнергии с помощью СВЧ-излучения возрождается в связи с проблемами энергоснабжения беспилотных летательных аппаратов, труднодоступных объектов (в гористой местности, на островах и т.п.), восстановления подачи энергии при чрезвычайных ситуациях. При этом требуется передавать мощность от единиц до десятков киловатт с помощью компактных передатчика и приемника.

Рабочая частота системы транспортировки определяется наличием мощных эффективных источников СВЧ-энергии, и требование компактности системы заставляет отдавать предпочтение более коротковолновым приборам. По этой причине наряду с магнетронами дециметрового диапазона в качестве перспективных кандидатов рассматриваются клистроны сантиметрового диапазона и промышленные гиротроны длинноволновой части миллиметрового диапазона, которые имеют высокий КПД, используют постоянные магниты для фокусировки электронного пучка и могут работать без криогенной системы.

Использование коротковолнового излучения позволяет реализовать компактные антенные системы. Решетка ректенн (антенн, нагруженных полупроводниковыми выпрямителями), использующих диоды Шотки, достаточно проста, имеет высокий КПД и большой срок службы, однако не лишена и недостатков. К ним, в первую очередь, относится малая мощность единичного диода, что определяет большое число диодов в решетке и высокую стоимость приемника. Кроме того, поскольку высокий КПД диода возможен лишь при предельном уровне СВЧ-сигнала, вариации уровня мощности способны привести к деградации приемника из-за невысокой устойчивости диодов Шотки к перегрузкам по мощности. Такие вариации могут быть обусловлены, например, флуктуациями положения радиолуча на полотне приемной антенны. Это говорит о необходимости создать приемник, использующий единственный "выпрямительный" СВЧ-прибор, который должен сочетать высокую эффективность и малое время готовности полупроводниковых преобразователей с большой мощностью, высокой надежностью и низкой стоимостью вакуумных приборов.

АВТОЭМИССИОННЫЙ ДИОД

В качестве перспективного кандидата на роль приемного СВЧ-прибора предлагается вакуумный диод на основе автоэмиссионного катода. До сих пор металлические автоэмиссионные катоды рассматривались как высоковольтные, слаботочные и малостабильные источники электронного пучка. Это объясняется высокой чувствительностью автоэмиссии к отравлению поверхности катода адсорбируемыми на ней веществами (присутствующими в техническом вакууме), химической активностью металлов и невозможностью очистки поверхности катода путем нагрева. Однако в последние годы интенсивно развивается направление эмиссионной электроники, связанное с использованием различных углеродных наноматериалов. Такие материалы химически инертны, имеют развитую структуру и обладают высоким усилением электрического поля на нановыступах, поэтому эмиттеры на их основе позволяют в техническом вакууме при напряженности электрического поля около 10 кВ/мм получить довольно стабильную плотность тока эмиссии до 1–2 А/см² при общем токе в единицы ампер. Использование таких сильноточных эмиттеров обеспечивает реализацию приемника СВЧ-энергии в виде параболической антенны, собирающей мощность в обычный волноводный тракт, к которому подключен резонатор, содержащий автоэмиссионный диод (рис. 1).

Предлагаемое решение позволяет создать простой, компактный, недорогой приемник, не чувствительный к колебаниям луча по полотну антенны. Однако воплощение этой идеи наталкивается на серьезную проблему. Для получения автоэмиссионного тока необходимо приложить к диоду значительное напряжение, а большое падение напряжения в открытом состоянии значительно снижает КПД преобразования СВЧ-энергии в напряжение постоянного тока.

Решением рассматриваемой проблемы может быть использование диода в режиме с углом пролета порядка π [4]. В этом случае

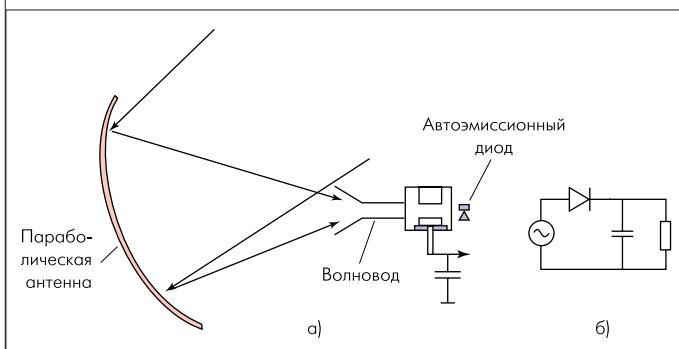


Рис. 1. Приемник СВЧ-энергии на основе автоэмиссионного диода: а) функциональная схема приемника; б) эквивалентная схема приемника

*ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2002, №6, с.36–39.

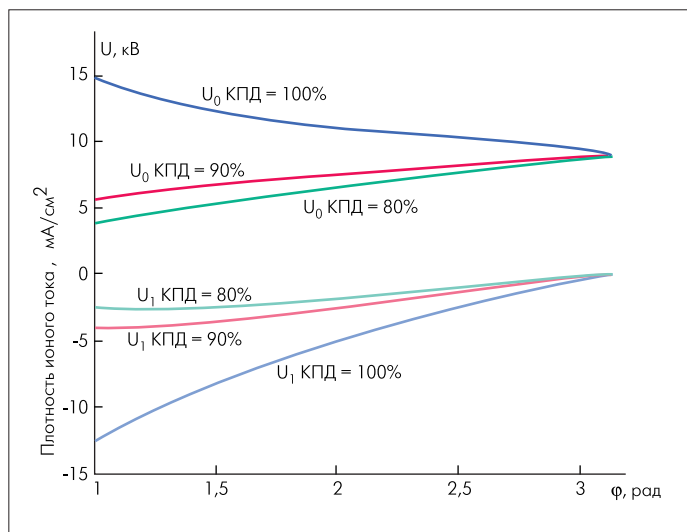


Рис.2. Зависимость напряжений на диоде от КПД и угла пролета

эмиссия с катода происходит в сильном поле в течение короткого интервала вблизи максимума положительной полуволны СВЧ-напряжения. Эмитированный сгусток электронов первоначально ускоряется приложенным полем, но за время его дрейфа в зазоре полярность поля меняется на противоположную, так что на заключительной фазе дрейфа он тормозится, почти полностью отдавая свою энергию статическому полю. В результате электронный КПД существенно повышается.

При синтезировании параметров диода, таких как ВЧ-напряжение U_1 , напряжение постоянного тока U_0 , зазор d , в качестве исходных параметров задается углом пролета ϕ , полем E , при котором происходит эмиссия, и электронным КПД. В результате получаем напряжения, пропорциональные $\lambda^2 E^2$ (λ – длина волны СВЧ-сигнала), и зазор d , пропорциональный $\lambda^2 E$.

В качестве примера можно сделать численные оценки параметров диода для рабочей длины волны $\lambda=3$ см при автоэммиттере с $E=10$ кВ/мм. Полученная зависимость напряжения на диоде от КПД и угла пролета показана на рис.2, величина зазора как функция угла пролета – на рис.3.

СВЧ-ПОТЕРИ В РЕЗОНАТОРЕ

Как видно из приведенных оценок, амплитуда ВЧ-напряжения на диоде достигает нескольких киловольт. При этом отдельного анализа требует вопрос о СВЧ-потерях в резонаторе и контурном КПД прибора. Зависимость контурного и полного КПД от угла пролета (рис.4) показывает, что существует оптимальный угол пролета, при

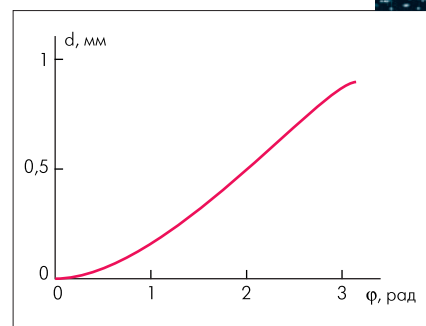


Рис.3. Величина зазора как функция угла пролета

котором потери в резонаторе минимальны.

Для рассмотренного примера с эмиттером площадью $0,5 \text{ см}^2$ и плотностью тока 2 А/см^2 имеем оптимальный угол пролета $\varphi = 1,58 \text{ рад}$, зазор $d = 0,34 \text{ мм}$, амплитуду ВЧ-напряжения $U_1 = 6,89 \text{ кВ}$, выпрямленное напряжение $U_0 = -3,44 \text{ кВ}$, выходную мощность $3,88 \text{ кВт}$, технический КПД = 70%, плотность мощности, рассеиваемой на аноде, 760 Вт/см^2 (что может быть отведено даже воздушным охлаждением). Как видно, аналитические оценки параметров системы дают вполне разумные значения.

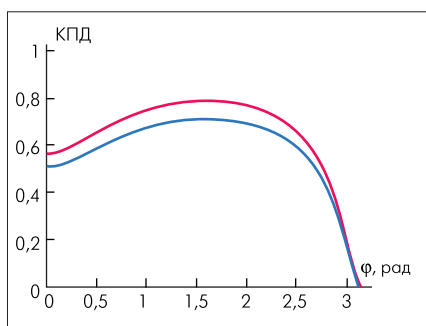


Рис.4. Зависимость контурного и полного КПД от угла пролета

вается приемлемым даже при высокой удельной мощности на аноде.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для проверки справедливости аналитических оценок характеристик преобразователя СВЧ-энергии в постоянный ток было проведено численное моделирование движения ансамбля частиц в переменном поле диода с учетом влияния поля пространственного заряда и вторичной эмиссии. Отметим, что обратная бомбардировка катода пренебрежимо мала по сравнению со случаем использования термокатода в диоде. Для анализа токооседания на антидинатронную сетку получены траектории частиц, стартовавших в момент времени, соответствующий максимуму положительной полуволны поля, из различных точек катода на периоде сетки. Из них видно, что токооседание первичных электронов на сетку, как и эмиссия вторичных электронов с анода, отсутствуют. Таким образом, численное моделирование подтверждает результаты аналитического рассмотрения.

ВЛИЯНИЕ ВТОРИЧНОЙ ЭМИССИИ

Следует заметить, что осаждение сгустка на анод происходит в тормозящей фазе электрического поля. Возникающие при этом вторичноэмиссионные электроны могут ускоряться полем обратно к катоду, отбирая энергию от ВЧ-колебаний и понижая КПД системы.

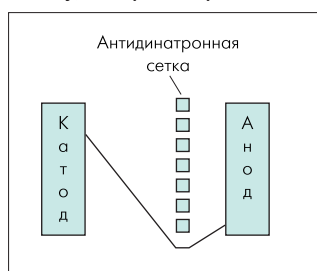


Рис.5. Распределение статического потенциала в зазоре при наличии антидинатронной сетки

Учитывая, что коэффициент вторичной эмиссии металлического анода менее 0,3 получить трудно, данный эффект может существенно ухудшить КПД приемника. Решением проблемы может стать использование антидинатронной сетки, находящейся в зазоре диода вблизи анода и имеющей отрицательный потенциал в несколько десятков вольт по отношению к аноду (рис.5).

При анодном напряжении $3,4 \text{ кВ}$ запирающий потенциал на сетке $50\text{--}70 \text{ В}$ практически не изменит электронный КПД, но устранил вторичную эмиссию. Более того, при правильно подобранном соотношении потенциала сетки и энергии первичных электронов у анода (зависящей от амплитуды ВЧ-напряжения) можно предотвратить оседание первичных электронов на сетку. Таким образом, тепловой режим сетки оказы-

Предложенная конструкция эффективного преобразователя СВЧ-энергии в постоянный ток на основе автоэмиссионного диода показывает возможность использования электровакуумного прибора в качестве приемника системы транспортировки энергии с помощью СВЧ-луча. Такой диод — один из представителей нового класса электровакуумных приборов с модуляцией холодной эмиссии СВЧ-сигналом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Patrick Collins. SPS-2000 and its internationalization. http://www.spacefuture.com/archive/sps_2000_and_its_internationalisation.html
2. Vanke V. SPS Investigation in the C.I.S. and in Moscow State University: MSU, 1993.
3. Ito T., Fujino Y., Fujita M. Fundamental Experiment of a Rectenna Array for Microwave Power Reception. — IEE Transactions on Communications, 1993, v. E76-B, №12.
4. Галдецкий А.В. О возможностях использования вакуумных приборов с холодным катодом для преобразования СВЧ-энергии в постоянный ток. — Труды 13-й Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", 2003 г., Севастополь.