

УДК 621.362

В.А.Дзензерский, докт. техн. наук, **И.И.Соколовский**, канд. физ.-мат. наук, **А.В.Кравченко**,
С.В.Плаксин, докт. физ.-мат. наук, **Л.М.Погорелая**, **Ю.В.Шкиль** (Ин-т транспортных систем и технологий НАН Украины, Днепропетровск)

Исследование возможностей построения преобразователей СВЧ излучения, транспортируемого с орбитальных фото-СВЧ энергоустановок, в ток промышленной частоты на активных твердотельных полупроводниковых структурах

Предложен метод высокоэффективного преобразования сверхвысокочастотного излучения высокой мощности в ток промышленной частоты, основанный на использовании активных твердотельных полупроводниковых структур, проявляющих внешнее отрицательное сопротивление в сильных электрических полях.

Запропоновано метод високоефективного перетворення надвисокочастотного випромінювання високої потужності в струм промислової частоти, який базується на використанні активних твердотільних напівпровідникових структур, що проявляють зовнішній негативний опір у сильних електричних полях.

Поиски альтернативных источников электроэнергии в последние годы породили интерес к солнечной электроэнергетике как экологически наиболее чистой. В технологически развитых странах ведутся поиски оптимальных путей построения фотоэлектрических преобразователей (материалы и конструкции) и способов базирования указанных фотоэлектрических преобразователей. Учитывая относительно невысокий коэффициент преобразования солнечной энергии в электрический ток серийно освоенных преобразователей (порядка 13%, что соответствует съему 100 Вт энергии с одного квадратного метра фотопреобразовательного модуля в средних широтах), для создания солнечной электростанции (СЭС) мега- и гигаваттной мощности требуются значительные земельные территории. Кроме того, обслуживание таких электростанций, включая защиту от неблагоприятных метеорологических факторов, сопряжено со значительными затратами.

Поэтому выдвинутая еще в 60-е годы [1] и модифицированная в последующий период [2, 3] концепция орбитальной солнечной электроэнергетики, которая включает преобразование солнечной энергии в постоянный ток и затем, с помощью соответствующих радиотехнических, также располагаемых на орбитальной платформе устройств (преимущественно магнетронов), в

СВЧ энергию, транспортируемую в виде сфокусированного радиолуча на Землю для последующего преобразования в постоянный ток, позволяет решить проблему эффективного использования солнечного излучения.

В последние годы интерес к солнечной космической энергетике резко вырос в связи с развитием малогабаритных полупроводниковых источников СВЧ излучения (лавинно-пролетных диодов, диодов Ганна, TRAPPAT-диодов и др.), соответствующая комбинация которых (суммирование) может успешно заменить вакуумные приборы этого типа – магнетроны. Согласно оценкам, за счет такой технологии производство электроэнергии можно увеличить в 20 раз [4] по сравнению с наземными фотоэлектрическими комплексами, прежде всего, из-за существенно более низкого поглощения солнечной энергии на высотах геостационарных орбит, по сравнению с поглощением в нижних слоях атмосферы. Вероятно, из перечисленных источников СВЧ излучения наиболее приемлемыми являются диоды Ганна, у которых питающие напряжения и токи сопоставимы с таковыми фотоэлектрических модулей установленных размеров.

Внедрение такой технологии актуально уже сегодня ввиду необходимости резкого сокращения потребления газа как топлива в тепловых

электростанциях и, соответственно, необходимости замены выводимых мощностей для покрытия дефицита энергии иными источниками электроэнергии мега- и гигаваттных уровней.

При этом нерешенной является задача преобразования СВЧ энергии высоких плотностей мощности непосредственно в ток промышленной частоты. Для этих целей уже в течение длительного времени разрабатываются электронные СВЧ преобразователи. В них используется явление циклотронного резонанса электронов – СВЧ излучение при взаимодействии с потоком носителей заряда электронной пушки обеспечивает циклотронное вращение электронов, и в области цилиндрического электрода, по оси которого проходит электронный поток на пути к барьерному электроду и затем к коллектору, происходит преобразование вращательной энергии электронов в энергию их поступательного движения. Мощность постоянного электрического тока выделяется на резисторе, расположенном в цепи, соединяющей коллектор с катодом электронной пушки [5–10].

Сложность такого способа преобразования СВЧ энергии (и устройства, его реализующего) очевидна. Кроме того, требуемое для осуществления циклотронного резонанса продольное магнитное поле должно иметь сложную конфигурацию; запитка фокусирующих электродов, цилиндрического электрода с ускоряющим потенциалом и барьерного электрода достаточно сложна; сложным как по конструкции, так и в настройке является и узел ввода СВЧ энергии в электронный поток. Наличие в устройстве подогреваемого катода с мощной эмиссией электронов резко снижает ресурс работы преобразователя. Кроме того, так как на нагрузочном резисторе выделяется энергия постоянного тока, имеющего ограниченные области использования, возникает потребность в дополнительном преобразователе постоянного тока в переменный, что усложняет и удорожает систему преобразования в целом и приводит к снижению коэффициента полезного действия.

Поэтому параллельно развивались иные технологии, которые, как предполагалось, могут решить указанные недостатки циклотронных преобразователей, а именно – преобразователи на вакуумных выпрямительных диодах [11]. Хотя по

величине обрабатываемого СВЧ сигнала единственный вакуумный диод уступает конвертору, работающему на эффекте циклотронного резонанса, возможность последовательно-параллельного соединения большого количества диодов в матрицу позволяет частично упростить конструирование наземной приемно-выпрямительной системы – ректенны (англ. rectify – выпрямлять и antenna). Однако проблема невысокой долговечности ламп, связанной с ухудшением в процессе эксплуатации параметров катода, и неизбежное возникновение механических колебаний большеразмерных анода и катода накладывает серьезные ограничения на применение этих приборов. И в целом – указанные технические решения по преобразованию СВЧ энергии в питающие напряжения с использованием вакуумных приборов лежат вне магистральных путей развития современной технической электроники, базирующейся на использовании разнообразных физических эффектов в полупроводниках, и в недалеком прошлом делались попытки исправить ситуацию.

Так, предложенное в [12] устройство, использующее в качестве отдельного элемента ректенны полупроводниковый преобразователь СВЧ энергии в энергию постоянного тока на основе диода с барьером Шоттки, конструктивно несложное и легко вписывается в конструкцию ректенны. Однако его функционирование возможно только при малых уровнях входной СВЧ мощности, так что даже незначительное сверхнормативное увеличение мощности или величины сопротивления нагрузки ведет к увеличению потерь СВЧ сигнала и, соответственно, к снижению коэффициента полезного действия, а также к возникновению пробоя барьера вследствие увеличения обратного напряжения на барьере, что, естественно, снижает надежность функционирования системы. Кроме того, при коммутации большого количества модулей, входящих в состав ректенны, из-за низкой удельной мощности (единицы ватт) и низкого выходного удельного напряжения (1...4 В) существенно снижается надежность функционирования всей приемно-выпрямительной системы вследствие лавинно развивающегося пробоя даже при незначительных перегрузках системы.

В основе разработанного нами устройства преобразования СВЧ энергии в переменный ток [13] лежит явление дифференциального и внешнего отрицательного сопротивления, проявляющееся в объемных полупроводниковых структурах в сильных электрических полях.

Приведенное на рис. 1 графическое построение иллюстрирует механизм возникновения внешней отрицательной проводимости. Обозначения, приведенные на рисунке: U, I – напряжение на полупроводниковой структуре и ток через нее; I_{\max}, I_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значение тока; U_m – амплитуда СВЧ напряжения, развивающегося в волноводе за счет поступающей СВЧ мощности; $U_{кр}$ – критическое значение напряжения на полупроводниковой структуре, приводящее к возникновению отрицательной дифференциальной проводимости, так что вольт-амперная характеристика (ВАХ) полупроводниковой структуры приобретает N -образный вид; ω – круговая частота; t – время.

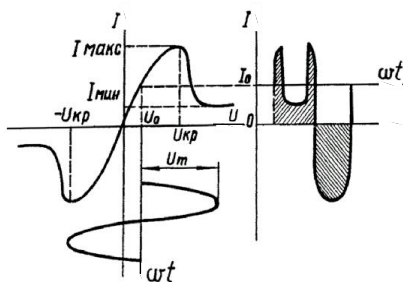


Рис. 1. Возникновение внешней отрицательной проводимости.

Среднее значение плотности тока $\langle I \rangle$, протекающего через полупроводниковую структуру за счет приложенного к ней постоянного U_0 и сверхвысокочастотного $U_m \cos \omega t$ напряжений, может быть определено из интегрального уравнения:

$$\langle I \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sigma_n (U_0 + U_m \cos \omega t) d\omega t \approx \frac{U_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{\partial I}{\partial U} \right)_{U_m \cos \omega t} d\omega t,$$

так что удельная проводимость полупроводниковой структуры $\sigma_n = \frac{\langle I \rangle}{U_0 + U_m \cos \omega t}$, как функция

постоянного ("подпирающего") напряжения U_0 и сверхвысокочастотного $U_m \cos \omega t$, является отрицательной при больших амплитудах сверхвысокочастотного напряжения, и полупроводниковая структура обладает внешним (на клеммах) отрицательным сопротивлением, причем отрицательным является как статическое, так и дифференциальное сопротивление.

Поэтому, если к полупроводниковой структуре, обладающей внешней отрицательной проводимостью, подключить колебательный контур, на нем можно получить напряжение на резонансной частоте контура, в том числе, на промышленных частотах.

На рис. 2 приведена электрическая схема устройства.

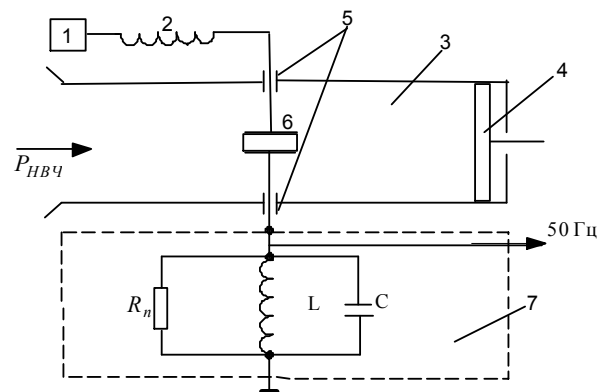


Рис. 2. Электрическая схема устройства преобразования СВЧ энергии в переменный ток промышленной частоты: 1 – источник постоянного напряжения; 2 – блокировочный дроссель; 3 – отрезок прямоугольного волновода; 4 – подвижный короткозамыкающий поршень; 5 – фильтр нижних частот; 6 – полупроводниковая структура; 7 – колебательный контур.

Конструктивно устройство выполнено в виде отрезка волновода, в котором устанавливался подключенный к источнику питающего напряжения полупроводниковый элемент из однородно легированного материала с отрицательной дифференциальной проводимостью в виде круглой или квазиквадратной в поперечном сечении пластины с контактными поверхностями – электродами, обращенными к широким стенкам отрезка прямоугольного волновода. Один из электродов через введенный блокировочный дроссель подключался к источнику постоянного напряжения, второй – к колебательному контуру, резонансная

частота которого соответствовала одной из промышленных частот.

Благодаря тому, что контактные поверхности полупроводниковой структуры лежат в плоскости широких стенок прямоугольного волновода, в котором электрическая компонента для основной моды H_{10} электромагнитного излучения находится в плоскости поперечного сечения и параллельна узким стенкам волновода, обеспечивается коллинеарность полей (постоянного и сверхвысокочастотного), эффективное контролирующее влияние СВЧ поля на характер формирования электрической доменной неустойчивости в объеме полупроводника, что позволяет обеспечить режим, при котором реактивная составляющая проводимости полупроводниковой структуры минимальна, и обеспечивается хорошее согласование полупроводниковой структуры с волноводной линией (последнее важно с точки зрения получения высоких значений КПД устройства).

Блокировочный дроссель, через который подается постоянное напряжение на полупроводниковую структуру, служит для предотвращения попадания развившегося в колебательном контуре тока промышленной частоты в блок постоянного напряжения.

Тщательно проведенные теоретические и экспериментальные исследования, нацеленные на то, чтобы обеспечить возникновение внешней (на клеммах полупроводниковой структуры) отрицательной проводимости и возникновение автоколебаний в подключенном к полупроводниковой структуре колебательном контуре, собственные частоты которого соответствуют общепринятым значениям частот промышленных сетей (50, 60 и 400 Гц) и при использовании известных технологических частот СВЧ излучения, позволили установить электрофизические параметры полупроводникового материала и геометрические размеры полупроводниковой пластины, которые связаны с частотами преобразуемых СВЧ сигналов следующими соотношениями:

$$n_0 L = (1,5 \dots 4,5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2};$$

$$\frac{n_0}{f_{1,2}} = (2,1 \dots 9,5) \cdot 10^5 \text{ с} \cdot \text{см}^3;$$

$$L = (5 \dots 20) \text{ мм};$$

$$\rho = (0,2 \dots 0,6) \text{ Ом} \cdot \text{см},$$

где n_0 – концентрация носителей заряда (электронов) в материале пластины; L – размер полупроводниковой пластины в направлении, совпадающем с направлением тока (расстояние между электродами); ρ – удельное сопротивление полупроводникового материала; f_1 и f_2 – частоты СВЧ сигнала, равные 2450 МГц и 5800 МГц, которые обеспечивают реализацию механизма междолинного переноса электронов (механизма, приводящего к образованию в объеме полупроводника отрицательной дифференциальной проводимости при напряженности поля 2...7 кВ/см и возникновению электрической доменной неустойчивости, обеспечивающей появление внешней (на клеммах) отрицательной проводимости полупроводниковой структуры).

Указанный интервал продольного геометрического размера полупроводниковой структуры соответствует реальным значениям плотности СВЧ мощности, поступающей в ректенну, и, соответственно, развиваемым в волноводной линии напряженностям СВЧ электрического поля при реально достижимых значениях мощности СВЧ излучения, поступающего с орбитальных фото-СВЧ энергоустановок или транспортируемого между наземными пунктами генерации СВЧ мощности и ее потребителями.

Интервал величины удельного сопротивления ρ полупроводникового материала пластины, связывающего концентрацию и подвижность носителей заряда, определен для всех известных к настоящему времени полупроводниковых материалов группы A_3B_5 (арсенид галлия, фосфид индия, теллурид кадмия и т.д.), технология производства которых достаточно хорошо освоена и в которых может быть реализован междолинный перенос электронов и отрицательная дифференциальная проводимость.

Соотношение между концентрацией электронов в полупроводниковом материале и частотами преобразуемого СВЧ сигнала предполагает использование двух частот излучения – 2450 МГц и 5800 МГц, выделенных Международной электро-

технической комиссией для применения в технологических производствах и используемых разработчиками солнечных космических электростанций ввиду хорошей радиопрозрачности атмосферы для этих частот излучения [14].

Исследования экспериментальных образцов преобразователя проводились с использованием в качестве источников СВЧ сигнала частотой 2450 МГц магнетронов типа UAM-1. Полупроводниковые структуры изготавливались из монокристаллического арсенида галлия фирмы *Monsanto* (США) с тщательно измеренными параметрами концентрации и подвижности электронов, металлические контактные поверхности (электроды) к структурам изготавливались плазмоконденсатным методом. Эффективными оказались для работы на высоких уровнях СВЧ мощности специально разработанные волноводные устройства – подвижный короткозамыкающий поршень для согласования полупроводниковой структуры с волноводной линией и механизм настройки, обеспечивающий высокую фиксирующую способность устройства [15].

На рис. 3 представлены осциллограммы напряжений, развившиеся в колебательном контуре на частоте 50 Гц (верхняя осциллограмма) и на частоте 60 Гц (нижняя осциллограмма). При этом при конструировании контура последний был оптимизирован по величине собственной добротности на частоту 50 Гц, а его функционирование на частоте 60 Гц (американский стандарт) обеспечивалось регулировкой величины индуктивности этого же контура.

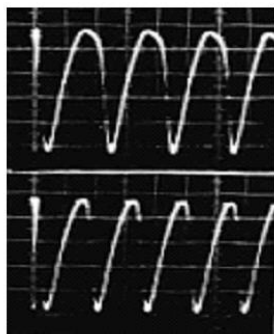


Рис. 3. Осциллограммы колебаний в низкочастотном колебательном контуре.

Как видно, форма колебаний на обеих частотах максимально приближена к синусоидальной и может быть улучшена за счет повышения добротности контура (современные технологии получе-

ния материалов с высокотемпературной сверхпроводимостью позволяют это обеспечить).

Поскольку отрицательная дифференциальная проводимость для наиболее освоенного промышленностью материала – арсенида галлия – охватывает диапазон электрических полей до 30 кВ/см, то для полупроводниковой структуры с продольным размером 10 мм, установленной в отрезке волновода пониженного сечения (с поперечными размерами $90 \times 22,5$ мм² на частоте 2450 МГц), при обеспечении надежного теплоотвода от полупроводниковой структуры возможно преобразование СВЧ сигнала мощностью до 500 кВт при коэффициенте полезного действия 80-90%. Даже если в интересах обеспечения надежного функционирования устройства, а именно предотвращения электрических пробоев в полупроводниковой структуре при неоднородном распределении электрического поля, входную СВЧ мощность ограничить 100 кВт, то и в этом случае один модуль-преобразователь в соответствии с разработанным техническим решением может заменить матрицу из нескольких сотен последовательно-параллельно соединенных выпрямительных диодов Шоттки в практических реализациях ректенны.

Возможно параллельное соединение модулей-преобразователей, причем, во избежание переотражения СВЧ мощности от не полностью согласованной с волноводной линией полупроводниковой структуры, преобразователь может быть построен по мостовой схеме [16]. При этом часть СВЧ мощности, не участвующая в преобразовании в ток промышленной частоты, в мостовой схеме может быть преобразована непосредственно в тепло, что позволит осуществить полное использование СВЧ мощности, поступающей с орбитальной фото-СВЧ энергоустановки.

Разработанный преобразователь СВЧ мощности в ток промышленной частоты, как и космическая фото-СВЧ энергетика в целом, имеет огромный потенциал развития: используя интенсивный поток солнечного излучения на геостационарной орбите (более $1,4$ кВт/м²) с высоким содержанием участков спектра, эффективно преобразуемых в электричество, удастся передавать полученную энергию на поверхность Земли непрерывно – вне зависимости от времени суток и погодных усло-

вий. За счет наклона экваториальной плоскости к плоскости эклиптики под углом $23,5^\circ$ космическая платформа на геостационарной орбите с соответствующим образом размещенными фотоэлектрическими преобразователями постоянно освещена потоком солнечной радиации, и лишь в небольшие периоды времени (вблизи дней весеннего и осеннего равноденствия, составляющих менее 1% от общей продолжительности года, и эти дни могут быть легко предсказаны) космическая платформа попадает в тень Земли.

В Украине освоено серийное производство фотоэлектрических преобразователей, работоспособных в условиях открытого космоса (НПО "Квазар-микро", Киев), магнетронов – важного компонента космических и фото-СВЧ энергоустановок – с выходной мощностью до 6 кВт (типа UA M-3, ВО "Октава", Киев), высокая когерентность излучения которых позволяет формировать высокоинтенсивные пучки СВЧ излучения от множества таких источников по технологии фазированных решеток и точно направлять их на Землю, сократив до минимума размеры системы приема (ректенны) и занимаемые земельные площади, а также уменьшив экологическую нагрузку на близлежащие территории; технологией изготовления более мощных магнетронов располагает Днепропетровский машиностроительный завод (г. Днепропетровск). Энергетические возможности разработанного преобразователя позволяют обрабатывать СВЧ излучение с большой плотностью потока мощности.

Украина располагает развитой ракетно-космической отраслью и технологиями развертывания в космосе крупногабаритных объектов, и хотя коммерческие проекты требуют создания ракетносителей нового типа, в настоящее время с использованием уже существующих средств доставки грузов на геостационарные орбиты можно накопить значительный технологический опыт и подготовить основу для формирования коммерческих фотоэлектрических энергетических систем.

Выводы. Разработанный преобразователь СВЧ энергии в ток промышленной частоты базируется на широкомасштабном использовании новых физических явлений и средств современной полупроводниковой электроники и может ока-

заться полезным на всех стадиях становления солнечной космической энергетики.

1. *Каница Л.Л.* Электроника больших мощностей. – М: Изд. АН СССР, 1962. – 210 с.
2. *Ванке В.А., Лопухин В.М., Савин В.Л.* Проблемы солнечных космических электростанций // Успехи физических наук. – 1977. – Т. 123, Вып. 4. – С. 633–639.
3. *Glaser P.E.* Power from the Sun: its Future // Science. – 1968. – V. 162. – P. 857–859.
4. *Leonard D.* Plug in to Sun // New Sci. – 2007. – V. 196. – No. 2631. – P. 42–45.
5. *Гречушкин К.В., Гурзо В.В., Прокушин В.Н., Стельмахов В.С.* Электронный СВЧ конвертор с плоским симметричным реверсом магнитного поля // Известия вузов СССР. Радиоэлектроника. – 1978. – Т. XX1, № 10. – С. 96–100.
6. *Watson D.S., Talbot K.I., Jonson C.C.* A cyclotron wave microwave power converter // Proc. IEEE. – 1965. – V. 53. – № 10. – P. 1797–1799.
7. *Vanke V.A., Savuin V.L., Bondzinki I.A.* Development of cyclotron-wave converter // WPT 95: Proc. 2-nd WPT Conf., 1995, Jubern., Kobe, Japan. – 1995. – P. 3–9.
8. *Vanke V., Matsumoto H., Shinohara N., Kita A.* Cyclotron Wave Converter of Microwaves into DC // IEICE Trans. on Electronics (Japan). – 1998. – V. E81-C. – No. 7. – P. 1136–1140.
9. *Ванке В.А.* Поперечные волны электронного потока в микроволновой электронике // Успехи физических наук. – 2005. – Т. 175. – № 9. – С. 957–963.
10. *Будзинский К., Быковский С., Ванке В.* Нетрадиционная вакуумная СВЧ-электроника на основе поперечных волн электронного потока // Электроника: НТВ. – 2005. – № 4. – С. 38–41.
11. *СВЧ-энергетика* / под ред. Э. Окресса. – М.: Мир, 1971. – Т.1.– 407 с.
12. *Бояхчан Г.П., Ванке В.А., Лесота С.К.* Аналитический анализ полупроводникового выпрямителя ректенны // Физические основы твердотельной электроники СВЧ: тез. докл. X Всесоюз. науч. конф. 20-23 сентября 1983 г. – Минск, 1983. – С. 252–253.
13. *Пат. 92531 Україна, МПК H01Q 1/24, H01Q 21/06, H01P 1/00, H03B 9/00, H01L 35/00.* Пристрій перетворення НВЧ енергії в змінний струм промислової частоти. – Опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.
14. *Ванке В.А.* СВЧ электроника – перспективы в космической энергетике // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2007. – № 6. – С. 12–15.
15. *А.с. 1427455 (СССР).* Устройство для настройки волноводных узлов. МПК H01P 1/28 / И.И. Соколовский, В.Ф. Коломойцев, В.Я. Крысь, В.Н. Привалов. – Опубл. 30.09.88, Бюл. № 36.
16. *Соколовский И.И., Костылев С.А., Бучик П.Е., Резников В.Е.* Дифференциальная проводимость арсенида галлия в сильных полях и эффект стабилизации СВЧ поля // Электродинамика и физика СВЧ. – Днепропетровск: ДГУ, 1970. – С. 90–95.