

**АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ
ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ (ПРЕОБРАЗОВАНИЕ
СВЧ-ЭНЕРГИИ ОРБИТАЛЬНЫХ ФОТО-СВЧ ЭНЕРГОУСТАНОВОК
В ТОК ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ)**

С.В. Плаксин, Л.М. Погоріла, І.І. Соколовський

Институт транспортних систем та технологій НАН України «ТРАНСМАГ»

**АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
(ПЕРЕТВОРЕННЯ НВЧ-ЕНЕРГІЇ ОРБИТАЛЬНИХ ФОТО-НВЧ ЕНЕРГОУСТАНОВОК
У СТРУМ ПРОМИСЛОВОЇ ЧАСТОТИ)**

Указані шляхи перетворення надвисокочастотного випромінювання в постійний струм або струм промислової частоти. Розглянуто метод високоефективного перетворення НВЧ-випромінювання високої потужності за рахунок використання об'ємних напівпровідникових структур, які проявляють зовнішній негативний опір у сильних електричних полях.

Ключові слова: високочастотне випромінювання, струм, об'ємні напівпровідникові структури.

S.V. Plaksin, L.M. Pogorelaya, I.I. Sokolovskiy

Institute of Transport Systems and Technologies of National Academy of Science «Transmag»

**ALTERNATIVE SOURCES OF ECOLOGICALLY PURE ELECTRIC ENERGY
(TRANSFORMING OF SHF-ENERGY OF ORBITAL PHOTO-SHF-ENERGY
ARRANGEMENTS INTO CURRENT OF INDUSTRIAL FREQUENCY)**

Ways of transformation of superhigh frequent radiation to a DC or current of industrial frequency are shown. Method of high effective transformation of a MICROWAVE radiation of high power due to usage of bulk semi-conductive structures that show external negative resistance in strong electrical fields is considered.

Key words: high-frequent radiation, current, bulk semi conductive structures.

Поиски альтернативных источников электроэнергии породили в последние годы интерес к солнечной энергии как экологически наиболее чистой (Хамакава, 1987; Japan to launch solar ..., 2001; Leik, 1999; Довгий, 1999). В технологически развитых странах ведутся поиски оптимальных путей построения фотоэнергетических преобразователей (материалы и конструкции) и способов базирования указанных фотоэлектрических преобразователей. С учетом относительно невысокого коэффициента преобразования солнечной энергии в электрический ток серийно освоенных фотопреобразователей (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.

В течение ряда лет обсуждается вопрос более эффективного использования солнечной радиации по схеме: солнечная радиация преобразуется в электрический ток с помощью фотоэнергоустановок, размещенных на орбитальных платформах; электрический ток с помощью специальных радиотехнических устройств преобразуется в СВЧ-излучение, которое транспортируется на Землю, где используется либо для нагрева воды как теплоносителя в технологических целях, либо преобразуется в постоянный или переменный ток промышленной частоты. Преимущества данного подхода усматриваются в том, что на заатмосферных траекториях плотность потока мощности солнечного излучения в 5–6 раз выше, чем на поверхности Земли на широтах Украины, спектр излучения шире (водяные пары, озон и углекислый газ с малыми потерями пропускают лишь излучение с длиной волны 0,55 мк – зеленая часть спектра), что повышает коэффициент использования солнечного излучения. Действительно, современные материалы, используемые в гелиоэнергетике, – аморфный кремний (*aa-Si*), карбид кремния (*aa-SiC*, сплав), кремний-германий (*aa-SiGe*, сплав), нитрид кремния (*aa-SiN*, сплав) с переменной валентностью и переменной шириной запрещенной зоны позволяют получить многослойные структуры, чувствительные к полному спектру солнечного излучения (0,3–1,1 мк).

© Плаксин С.В., Погорелая Л.М., Соколовский И.И., 2003

При орбитальном базировании упрощается построение фокусирующих коллекторных систем и систем слежения за Солнцем.

В радиотехнике сверхвысоких частот известны методы выпрямления высокочастотных напряжений с помощью вакуумных СВЧ-диодов. Однако недостаточно высокая долговечность этих выпрямляющих устройств, связанная с ухудшением параметров катода, ограничивает возможности их использования. Имеются сообщения, что не так давно именно для СВЧ-энергетики в США (Ренсеровский политехнический институт) проводилась разработка полупроводниковых СВЧ-выпрямителей на диодах на основе гетеропереходов *Ge-GaAs* с пробивным напряжением около 100 В, а за счет использования матрицы с последовательно-параллельным соединением диодов предполагалось повысить пробивное напряжение до 1000 В при величине выпрямленного тока до 20 А с тем, чтобы получить до 10 кВт полезной мощности выпрямленного тока на одну пару матрицы диодов при величине рассеиваемой мощности не более 100 Вт на частоте 230 МГц (СВЧ-энергетика, 1971). К сожалению, информация о реализации данного проекта в открытой печати отсутствует. Несомненно, что низкие энергопрочностные характеристики полупроводниковых преобразователей на *p-n* или гетеропереходах существенно ограничивают их возможности при необходимости преобразования СВЧ-энергии высокой мощности.

В «Development of cyclotron-wave-converter» (1995) предложено техническое решение, использующее явление циклотронного резонанса электронов, которое в значительной мере преодолевает указанные затруднения. Суть этого способа преобразования СВЧ-энергии в энергию постоянного тока состоит в том, что СВЧ-мощность, взаимодействуя 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. Полная мощность постоянного электрического тока выделяется на резисторе, расположенном в цепи, соединяющей коллектор с катодом электронной пушки. Постоянный ток затем при необходимости преобразуется в переменный ток с помощью известных устройств этого типа. Очевидна сложность такого способа утилизации СВЧ-энергии. Требуемое для реализации циклотронного резонанса продольное магнитное поле должно иметь сложную конфигурацию, запитка фокусирующих электродов, цилиндрического электрода с ускоряющим потенциалом и барьерного электрода достаточно сложна, необходимость иметь подогреваемый катод резко снижает ресурс работы преобразователя. Сложным в настройке является узел ввода СВЧ-энергии в электронный поток. В целом такой способ преобразования СВЧ-энергии лежит, как представляется, вне магистральных путей развития технической электроники, базирующейся на использовании разнообразных эффектов в полупроводниках.

В арсенале современной полупроводниковой СВЧ-радиоэлектроники в последние годы появились объемные устройства на полупроводниковых материалах группы A_3B_5 (арсенид галлия и др.) без *p-n* переходов и проявляющие нелинейные свойства при полях 3–4 кВ/см (эффект разогрева электронов в сильных электрических полях), что обеспечивает практически неограниченные энергетические характеристики СВЧ-выпрямителей на такой основе. Заметим также, что в предыдущие годы технология производства указанных полупроводниковых материалов хорошо отработана (в Украине в ОАО «Чистые металлы», г. Светловодск), и связано это с необходимостью разработок генераторов и усилителей СВЧ-диапазона (диодов Ганна), сверхбыстродействующих ограничителей СВЧ-мощности, амплитудных модуляторов, девиаторов ЭПР (эффективной поверхности рассеяния) и т. д. (Костылев и др., 1977, 1978)).

Суть построения выпрямительного устройства на указанном эффекте можно пояснить, рассмотрев графическое построение, представленное на рис. 1.

Как указывалось ранее, эффект разогрева электронов в полупроводниках группы A_3B_5 приводит к тому, что вольт-амперная характеристика (ВАХ) образца этих полупроводников нелинейна и при некоторых напряжениях, приложенных к образцу, ток начинает падать и зависимость ток–напряжение может быть представлена искаженной буквой *N* (*N*-образная ВАХ). На рис. 1 изображена ситуация, когда к образцу приложено неболь-

шое постоянное напряжение и достаточно большое синусоидальное напряжение, обусловленное подачей на образец мощного СВЧ-излучения (обозначения: $I_{\text{макс}}$ – пороговый ток, $U_{\text{кр}}$ – пороговое напряжение, U_0 – постоянное напряжение на образце, ω , U_m – круговая частота и амплитудное значение СВЧ-излучения, $I_{\text{мин}}$ – минимальное значение тока в области полей выше пороговых («ток долины»). Плотность общего тока, протекающего через полупроводниковый образец при указанных условиях, может быть определена из интегрального уравнения (Дифференциальная ..., 1970)

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

так что проводимость образца $\sigma_n = \frac{\langle I \rangle}{U_0 + U_m \cos \omega t}$ будет изменяться за счет изменения как постоянного («подпирающего») напряжения U_0 , так и амплитуды СВЧ-напряжения.

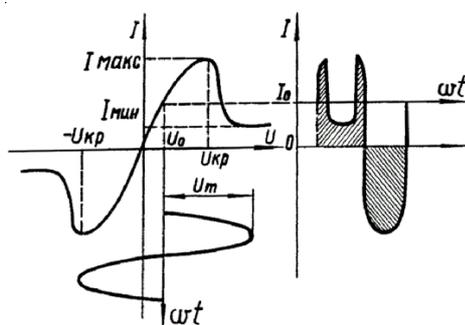


Рис. 1. Объяснение возникновения внешнего отрицательного сопротивления

Как видно из графического построения, форма тока, протекающего через образец, такова, что средний ток за период колебания является отрицательным, его величина зависит от соотносительных величин постоянного и высокочастотного напряжений, формы вольт-амперной характеристики образца и распределения электрического поля в образце. Учеными (Банис и др., 1972) рассмотрели случай равномерного распределения поля («плоскодолинная ВАХ»), что, скорее всего, нереально. Позже проанализирован случай (Костылев и др., 1977), когда вследствие образования доменов сильного электрического поля ВАХ-образца в области сильных полей имеет возрастающий характер. Ранее нами было также показано (Соколовский, Костылев, 1972), что при приложении к образцу сильного высокочастотного напряжения существует критическое значение частоты, при которой в образце формируется несколько доменов (многодоменный режим), вследствие чего интервал полей, при которых ток неизменный, увеличивается, за ним следует участок возрастания тока через образец, но электрическая прочность образца не снижается. Во всех случаях образец может обладать внешним (на клеммах) отрицательным сопротивлением, причем отрицательным является как статическое, так и дифференциальное сопротивление. Поэтому если последовательно с образцом подключить нагрузочный резистор, на последнем выделится постоянный ток. Если к образцу подключить колебательный контур (рис. 2), на нем можно получить напряжение на резонансной частоте контура, в том числе на одной из промышленных частот – 50 или 400 Гц.

Можно показать (Костылев и др., 1977), что форма колебаний может отличаться от гармонической, если частота СВЧ-излучения недостаточно высока (речь идет о соотносительных величинах периода СВЧ-поля и максвелловского времени релаксации), в образце образуются искажающие форму колебаний (они становятся релаксационными) домены электрического поля, и осциллограммы на рис. 3 это подтверждают (верхние осциллограммы 1–3).

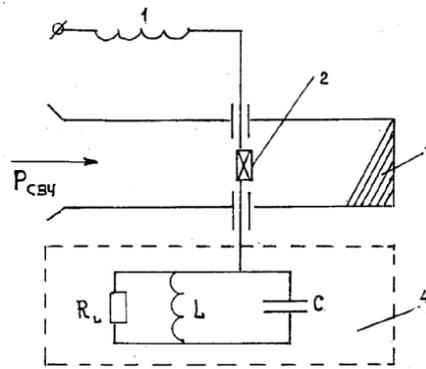


Рис. 2. Схема включения полупроводникового образца в волноводную линию и подключения его к резонансной нагрузке: 1 – блокирующий дроссель; 2 – образец; 3 – балластная поглощающая нагрузка; 4 – резонансная нагрузка; L, C – реактивные параметры нагрузочного контура промышленной частоты; R_L – нагрузка

Соответствующим выбором параметров полупроводникового материала можно получить колебания практически гармонической формы (осциллограмма 4).

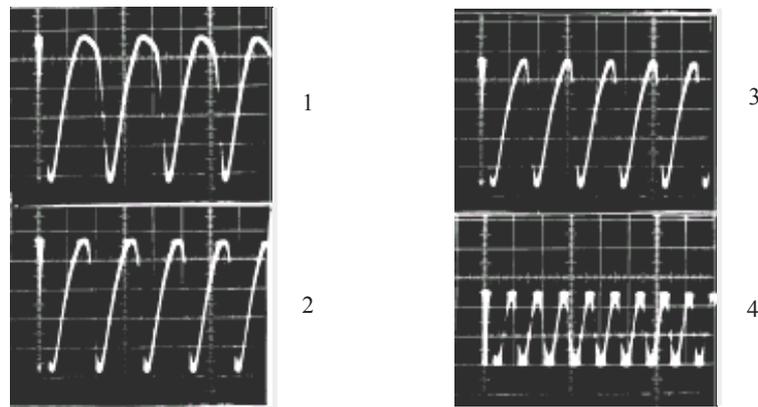


Рис. 3. Осциллограммы, иллюстрирующие форму колебаний тока в нагрузочном контуре при различных режимах работы выпрямляющего устройства

Энергетические характеристики образцов по низкочастотным колебаниям мы здесь не приводим. Подробно это описано нами ранее (Соколовский, Костылев, 1971; Костылев и др., 1977). Укажем лишь, что возможно параллельное соединение указанных модулей-преобразователей, причем во избежание переотражения СВЧ-мощности от не полностью согласованного с линией передачи полупроводникового образца модуль-преобразователь может быть построен по мостовой схеме (Дифференциальная ..., 1970; Костылев и др., 1978). Рассеянная часть СВЧ-мощности может быть преобразована непосредственно в тепло.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Хамакава Й. Фотоэнергетика // В мире науки. – 1987. – № 6. – С. 53-59.
 Leik N. Myrabo Highways Light // Scientific American. – 1999. – № 3 (March). – P. 27-30.
 Japan to launch solar power station // Photovoltaic insider's Rept. – 2001. – Vol. 20, № 3. – P. 2.

Development of cyclotron-wave-converter / V.A. Vanke, V.L. Savuin, I.A. Bondzinki et al. // Proc. 2-nd Jubern. WPT Conf. WPT'95, Kobe, Japan, 1995. – P. 3.

Банис Т.Я., Паршелюнас И.В., Пожела Ю.К. Абсолютное отрицательное сопротивление арсенида галлия при воздействии на него СВЧ-полем // Тр. Междунар. симпоз. по плазменным и электрическим неустойчивостям в твердых телах. – Вильнюс: Минтис, 1972. – С. 254-257.

Дифференциальная проводимость арсенида галлия в сильных полях и эффект стабилизации СВЧ-поля / И.И. Соколовский, С.А. Костылев, П.Е. Бучик, В.Ф. Резников: Сб науч. тр. – Д.: ДГУ, 1970. – 103 с.

Довгий С.О. Сонячно-воднева енергетика: між минулим і майбутнім // Вісник Національної академії наук України. – 1999. – № 11. – С. 6-9.

Костылев С.А., Гончаров В.В., Соколовский И.И. Исследование механизма стабилизации суперкритически легированных диодов Ганна, используемых в качестве усилителей СВЧ-мощности // Элементы радиоприемных устройств. – Таганрог: ТРТИ, 1978. – С. 23-30.

Костылев С.А., Гончаров В.В., Соколовский И.И. Полупроводники с объемной отрицательной проводимостью в СВЧ-полях. – К.: Наук. думка, 1977. – 141 с.

СВЧ-энергетика. Т. 3. Применение энергии сверхвысоких частот в медицине, науке и технике / Под ред. Э.Д. Шлифера. – М.: Мир, 1971. – 247 с.

Соколовский И.И., Костылев С.А. О механизме широкодиапазонной работы диодов Ганна в моде подавляемого домена // Тр. Междунар. симпоз. по плазменным и электрическим неустойчивостям в твердых телах. – Вильнюс: Минтис, 1972. – С. 262-266.

Соколовский И.И., Костылев С.А. О механизме низкочастотных колебаний при эффекте Ганна // Тез. докл. науч. сессии, посвящ. Дню радио. – М.: НТОРЭС, 1971. – С. 30.

Надійшла до редколегії 21.02.03