

Электронный прибор

Л. АШКИНАЗИ

Как он образуется

В электронной лампе электроны пролетают сквозь сетки. Представьте себе электронный поток, пронизывающий две близко расположенные сетки. Пока между сетками нет напряжения, стало быть, в зазоре между ними нет поля, каждый электрон вылетает из зазора с той же скоростью, с которой влетает в него. Когда напряжение между сетками есть, скорость электронов будет увеличиваться, если поле между сетками ускоряющее, и уменьшаться, если тормозящее. Что произойдет, если напряжение изменяется синусоидально? Электроны, пересекающие зазор при ускоряющем поле, будут двигаться быстрее тех, которые пересекали зазор при тормозящем поле. В результате электроны начнут собираться в сгустки, состоящие из электронов, пролетевших зазор раньше, но при тормозящем поле, и пролетевших позже, но при ускоряющем поле. При дальнейшем полете сгустки начнут разваливаться, ибо более быстрые электроны будут выбегать из сгустков вперед, а медленные — отставать.

Поток электронов, вышедший из сеточного зазора, называется модулированным по скорости — скорости разных электронов в нем различны. Поток электронов в области, где образовались сгустки, называется модулированным по плотности — плотность электронов в сгустках большая, а вне малая.

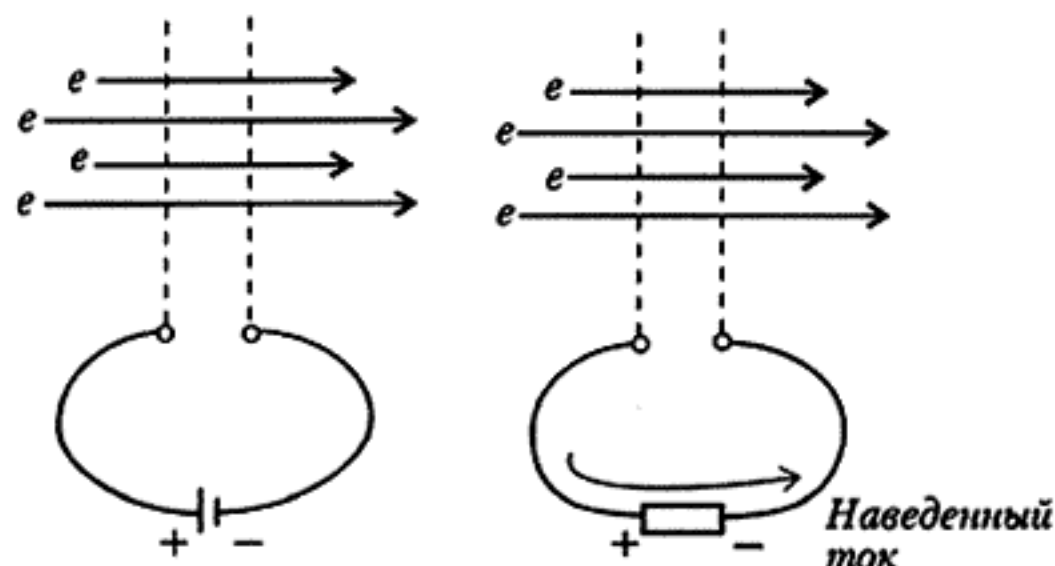


Рис. 1. Электронный поток, тормозящийся в сеточном зазоре. Тормозящее поле создается: слева — источником тока; справа — наведенным током, протекающим через резистор

Так образуется электронный прибор — электронные волны, накатывающиеся на берег... Идея, конечно, красивая, но зачем все это нужно? Как и для чего это можно использовать?

Восстанавливая ход мышления ученых и инженеров, не следует изображать его слишком уж логичным. Так что создавая прибор, названный ими «клистрон», — от греческого слова, означающего ударять или окатывать волной, — изобретатели, может быть, и не были строго логичными. В 1939 году братьям Р. и З. Вариян и, независимо, В. Хану и Г. Меткалфу стало интуитивно ясно, что на сетки можно подать и очень малое напряжение, но все равно электроны соберутся в сгустки, лишь бы дать им бежать достаточно долго. Ну а электронные сгустки — это что-то мощное, серьезное, почти осязаемое. Так что вроде бы можно малое напряжение преобразовать во что-то большее. Только во что?

Вот тут от полета интуиции пора переходить к логичности и последовательности.

Как его использовать

Модуляцию скорости мы создали, пропустив электронный поток между двумя сетками. Попробуем использовать ту же систему для отбора энергии от электронных сгустков. А энергии у них может быть много — ведь до того, как подвергнуть поток модуляции по скорости,

его можно разогнать высоким напряжением.

Пусть электронные сгустки пролетают через зазор между сетками, в котором имеется тормозящее поле (рис. 1, слева). Из зазора электроны выйдут с меньшими энергиями, нежели с которыми они вошли в него. Но куда девалась потерянная ими энергия? (Доля тока, перехватываемая сетками, мала, поэтому в данном случае энергией, идущей на нагрев сеток, можно пренебречь.)

Рассмотрим подробнее поведение тока в цепи электрода, к которому подлетает электронный сгусток. Сейчас мы введем очень важное для техники электровакуумных приборов понятие — «наведенный ток».

По мере подлета сгустка от левого электрода к правому (рис. 2) напряженность поля между левым электродом и сгустком убывает, а между сгустком и правым электродом возрастает. Действительно, разности потенциалов между левым электродом и сгустком и между сгустком и правым электродом равны, напряженность же поля будет больше в том зазоре, который меньше. Но раз напряженности поля слева и справа от сгустка изменяются, то изменяются и плотности зарядов на электродах и, следовательно, протекает ток в цепи, соединяющей эти электроды.

Теперь вернемся к рисунку 1 и увидим, что наведенный ток протекает не так, как в батарее, питающей какую-то нагрузку, а так, как в заряжаемом аккумуляторе. Итак, энер-

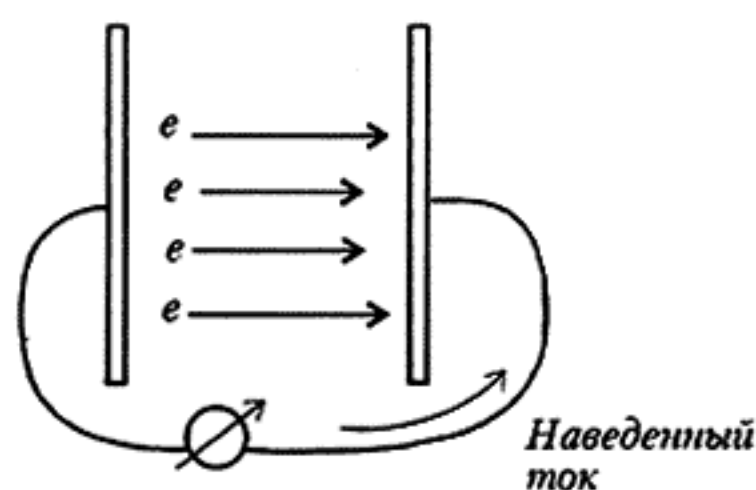


Рис. 2. Возникновение наведенного тока

гия, теряемая электронами, может заряжать аккумулятор или использоваться как-либо иначе. Теперь сделаем последний шаг — заменим источник сопротивления (см. рис. 1, справа). Обратите внимание на полярность напряжения, образующегося на сопротивлении в результате протекания по нему наведенного тока. Полярность такая, «как надо». Пучок будет тормозить сам себя, если сопротивление не равно нулю или бесконечности. Действительно, если полярность напряжения была бы иной, пучок сам собой бы ускорился. Как тогда быть с законом сохранения энергии? А так все в порядке — энергия, потерянная пучком, поступает в нагрузку и, если это простое сопротивление, переходит в тепло. Конечно, можно поступить и умнее (и сейчас мы узнаем, как). Но сначала подведем кратко итог — с помощью двухсеточного зазора можно создать у электронного пучка модуляцию по скорости, затем она преобразуется в модуляцию по плотности, и с помощью двухсеточного же зазора у такого пучка можно отнять энергию. Это все вместе и есть пролетный клистрон.

Зачем частотам быть сверхвысокими

Представьте себе, что надо передавать информацию с большой скоростью и в вашем распоряжении имеется передатчик, работающий на некоторой частоте f . С какой скоростью можно передавать информацию при наличии такого передатчика? Пусть мы можем управлять передаваемым сигналом, вырезая из него отдельные периоды колебаний (рис.3). Таким способом можно передавать информацию со скоростью f бит/с (1 бит — это один выбор из двух ситуаций: есть полуволна или нет; для передачи буквенного текста надо 5 бит на букву, с помощью 5 бит можно записать $2^5 =$

$= 32$ символа). Конечно, существует много видов модуляции, и скорости передачи информации с их помощью различны. Но порядок величины будет таким, как мы получили. Оценим теперь, какой частоты сигнал надо иметь, чтобы передать 100 текстов со скоростью нормальной речи или одну телевизионную передачу.

При нормальной речи человек произносит около 20 букв в секунду, т.е. надо передавать порядка 100 бит/с, а для передачи 100 разговоров одновременно достаточно иметь передатчик на частоте 10 кГц. Реально к радиочастотам относят частоты больше 100 кГц (волны короче 3000 м), т.е. любой радиопередатчик при соответствующей модуляции с этой задачей справится. Совсем иная ситуация с телевидением. Изображение содержит около $2 \cdot 10^5$ элементов. Положим, что нам достаточно 8 градаций яркости. Таким образом, для передачи одного элемента изображения надо иметь 3 бита, а для передачи всего изображения — $6 \cdot 10^5$ бит. Чтобы глаз не замечал мелькания, изображение должно меняться не реже 20 раз в секунду. Итак, $20 \cdot 6 \cdot 10^5$ бит/с $\approx 10^7$ бит/с, а частота передатчика должна быть не менее 10^7 Гц $= 10$ МГц. Эта частота соответствует длине волны 30 м, т.е. середине коротковолнового диапазона. Реально частота должна быть выше, поэтому телевизионные передачи ведут на частотах метрового диапазона и на еще более коротких волнах. Для передачи информации со все большей и большей скоростью нужны все более и более высокие частоты. Кроме того, высокочастотные электромагнитные колебания используются в радиолокации, для питания ускорителей и для многих других целей, вплоть до готовки в СВЧ-печах.

А не могут ли решать все необходимые задачи обычные электронные лампы?

Нельзя объять необъятное... с помощью обычной электронной лампы

Возьмем обычную электронную лампу, или, как ее называют, лампу с электростатическим управлением, и начнем понемногу увеличивать частоту сигнала, подаваемого на ее сетку. Как уже рассказывалось, когда время пролета электрона станет сравнимо с периодом переменного напряжения, электрон начнет часть времени пролета ускоряться, а часть... тоже ускоряться, но уже меньшим напряжением. Усиление на таких частотах оказывается меньше. При еще более высоких частотах часть периода электрон летит в тормозящем поле. Наконец, наступает ситуация, когда электрон вообще не будет чувствовать управляющее (сеточное) напряжение — за время его полета от катода до сетки успеет пройти период входного напряжения, а суммарное влияние двух полуциклов этого напряжения окажется равным нулю. На какой частоте это произойдет? Пусть напряжение на сетке 1 В, зазор сетка — катод 10 мкм. Тогда время пролета электрона от катода до сетки составит 0,35 нс (формулу $t = d\sqrt{2m/(eU)}$, где t — время полета, d — зазор, m и e — масса и заряд электрона, а U — напряжение, выведите сами), что соответствует частоте примерно 3 ГГц. Это и есть предельная частота, на которой можно заставить работать обычную лампу. Но проблема, связанная со временем пролета электрона от катода до сетки, не единственная.

Время пролета от сетки до анода тоже не равно нулю, и ничего хорошего это за собой не влечет. Поскольку напряжение на сетке изменяется, электроны влетают в зазор сетка — анод с разными скоростями. Такие электроны могут «перепутываться» — влетевшие позже, но с большими скоростями, могут обгонять влетевшие раньше, но с меньшими скоростями. Вам ничего не вспоминается? Это же преобразование скоростной модуляции в модуляцию по плотности! Но лампам прока от этого нет, а в импульсном режиме просто чистый вред — возникает искажение формы импульса.

Наконец, резонансная частота контура возрастает с уменьшением ин-

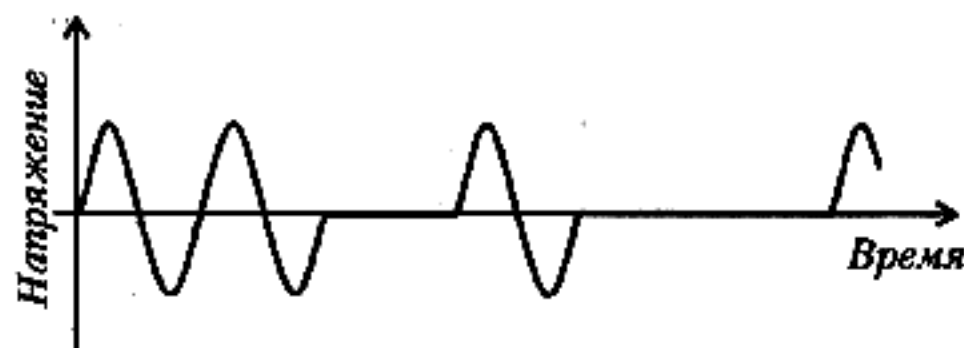


Рис.3. Передача информации с помощью модуляции (пример)

дуктивности и емкости (формула Томсона). Если лампа работает на некоторой частоте, обычно в ее сеточной и анодной цепях применяются контуры, настроенные на эту частоту. Но лампа имеет собственную емкость (между электродами) и собственную индуктивность (вводов). Ни меньше этой емкости, ни меньше этой индуктивности емкость и индуктивность контура сделаны быть не могут.

Итак, вот три проблемы — время пролета катод — сетка, время пролета сетка — анод, емкость/индуктивность лампы. Посмотрим, как решались эти проблемы.

Обратим недостатки в достоинства

Начнем с самого простого. Из формулы для времени пролета электрона от катода до сетки следует, что уменьшить его можно только уменьшением зазора или увеличением напряжения (т.е. увеличением скорости). Уменьшать зазор можно, конечно, не беспредельно. Сделать его меньше 10 мкм очень трудно. Обратимся к напряжению или скорости электрона. Естественно предложение — сначала ускорить электрон и лишь затем подвергать «управлению». Это и сделано в клистроне. Сначала электрон ускоряется относительно высоким напряжением и лишь затем вводится в двухсеточный управляющий зазор.

Время пролета сетка — анод тоже обращено на пользу — именно в это время, как вы уже знаете, скоростная модуляция преобразуется в модуляцию по плотности.

Но что делать с емкостями и индуктивностями? Представим себе кон-

тур, настроенный на очень высокую частоту. Конденсатор в нем — две пластины, индуктивность — кусок провода (рис.4). У такого контура есть недостаток — он будет сильно излучать в окружающее пространство. Как с этим бороться? Известно как — экранированием. Прокрутим мысленно провод, соединяющий пластины конденсатора, вокруг вертикальной оси — получим нечто, похожее на тор («бублик»). Вместе с пластинами он образует то, что называется «объемный резонатор». Емкость у него по-прежнему связана с пластинами, а индуктивность — все остальное. Точнее было бы сказать — электрическое поле сосредоточено в зазоре, магнитное — в остальной части.

Конечно, такой резонатор настроить на сколь угодно высокую частоту нельзя. Но все-таки... И главное — как хорошо объемный резонатор сочетается с двухсеточным зазором! Надо только сделать зазор из двух сеток, либо на лампу с двухсеточным зазором надеть снаружи (можно уже вне вакуума) «индуктивную» часть резонатора — «бублик». Для невооруженного глаза он выглядит пустым изнутри. Но мы-то знаем — внутри у него магнитное поле.

Итак, вот он, первый ЭВП СВЧ: катод, (за которым электроны ускоряются), входной зазор, входной резонатор, пролетная труба, выходной зазор, выходной резонатор и, наконец, коллектор-электрод, на который придут уже не нужные нам электроны, отдавшие свою энергию в выходном зазоре (рис.5).

Усилитель превращается в генератор

Выведем часть сигнала из выходного резонатора и вернем ее во входной. Если сдвиг фаз в самом клистроне и в цепи обратной связи такой, что часть выходного сигнала, возвращаясь на вход, совпадает по фазе со входным сигналом, усилитель может превратиться в генератор. Для этого еще надо, чтобы часть была не слишком маленькой — чтобы вернувшийся сигнал был больше исходного. Помните, что происходит на сцене, если усиление сигнала микрофона достаточно велико и на него попадает звук от динамиков? О фазе в этом случае заботится не приходится — генерация возбуждается на той час-

тоте, на которой сдвиг фаз во всей цепи составит 2π .

Заметим, что «сигналом» является в некотором смысле и сам электронный поток, точнее — распространяющиеся в нем электронные сгустки. Что если заставить их возвращаться во входной резонатор? Пусть, например, вместо второго резонатора стоит «отражатель» — электрод, на который подано отрицательное напряжение. Сгусток подлетит к нему, развернется и полетит назад, к входному зазору. Проходя через входной зазор, такой сгусток вызовет появление электрического поля. Если фаза этого поля такова, что оно будет усиливать модуляцию электронного потока, прибор начнет генерировать. Изменением напряжения на отражателе можно управлять временем полета сгустка между первым и вторым проходами через резонатор. Чем отрицательное напряжение на отражателе больше, тем на большем расстоянии от себя он остановит сгусток и заставит вернуться его в зазор. Напротив, уменьшением напряжения можно добиться ситуации, когда сгусток вернется не в первый «удачный» момент, а во второй (аналогия с качелями). Впрочем, мощность сигнала, генерируемого прибором — его называют отражательным клистроном, — будет в этом случае меньше. У отражательного клистрона есть одно приятное свойство — частота генерируемых им колебаний меняется при изменении напряжения на отражателе. Естественно — он генерирует на той частоте, на которой выполняется условие совпадения фаз (помните микрофон и динамик на эстраде?). А время полета сгустка и фаза его прибытия зависят, как вы уже знаете, от напряжения на отражателе.

Отражательный клистрон был создан в 1940 году В.Ф.Коваленко и, независимо от него, Н.Д.Девятковым, Е.Н.Данильцевым, И.В.Пискуновым. В течение десятилетий он был основным типом генератора СВЧ-колебаний. Его главным преимуществом перед другими была возможность «электрической перестройки» — управлением частотой путем изменения напряжения. Позже полупроводниковые приборы составили отражательному клистроному весьма серьезную конкуренцию. Однако в диапазоне миллиметровых длин волн ЭВП по-прежнему «дают фору» полупроводникам.

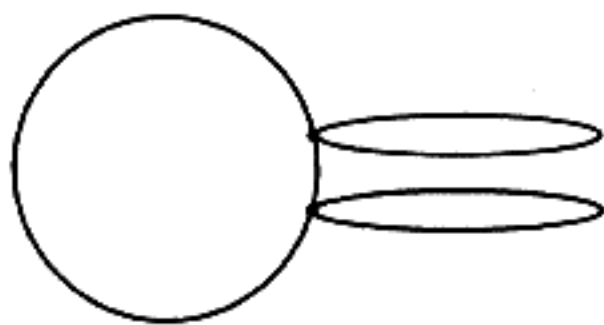


Рис.4. СВЧ-контур

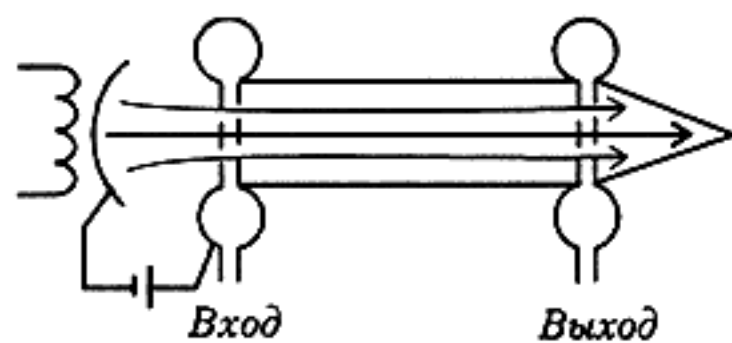


Рис.5. Пролетный клистрон

Все придумано. Осталось только сделать

Конечно, это шутка. Проблем в области технологии ЭВП СВЧ оказалось немало. Проще сказать, что там все — проблема. Во-первых, сетки, образующие зазор в резонаторе. Какая-то доля электронов оседает на этих сетках, мигом превращая всю свою кинетическую энергию в тепловую. Сетки делали и тугоплавкие, и с тонкими высокими ребрами (чтобы они лучше передавали тепло на охлаждаемую часть резонатора), но все равно — в мощных приборах сеток как таковых нет. Электронный пучок летит через отверстие — как бы через сетку с одним большим окном. (Рыболовная сеть такого типа позволила бы сохранить нетронутыми богатства всех морей и океанов!)

Следующая проблема — «окно для вывода энергии». Мощные электромагнитные колебания генерируются в вакууме, а нужны они нам снаружи прибора, в воздухе. Казалось бы, особой проблемы нет — любое стекло или керамика прозрачны для электромагнитного излучения и «не прозрачны» для воздуха. Но часть электромагнитного излучения поглощается стеклом или керамикой и нагревает ее. Керамика — материал сам по себе термостойкий, однако при нагреве увеличивается ее проводимость, она начинает сильнее поглощать электромагнитное излучение, еще сильнее нагреваться и так далее. Этот процесс называется тепловым пробоем, а кончается он сквозным проплавленным отверстием, соединяющим вакуумный объем прибора и атмосферу. Дальнейшее в пояснениях не нуждается.

Многие технологические проблемы, как и проблема изготовления сетки, сводятся к выбору материала. Причем ситуация обычно устроена так, что материал, который способен выдерживать более высокие температуры (например, тугоплавкие и прочные при высоких температурах молибден и вольфрам), будет и нагреваться сильнее (например, из-за плохой проводимости и плохой теплопроводности). Чистых металлов в природе не так уж много, но сплавов — не счесть. Вдобавок есть еще композитные материалы — например, смесь (не сплав!) вольфрама и меди, — сочетающие высокие проводимость, теплопроводность и прочность.

Многие ЭВП СВЧ работают в импульсном режиме. Это значит, что электронный поток обрушивается на поверхность коллектора импульсами — скажем, 1 мкс ток идет, а потом 1 мс тока нет. Здесь, на коллекторе, кончается короткая, но яркая биография электрона — в вакууме он ускорялся, тормозился и генерировал, а в металле есть только безликий «электронный газ», там электроны не отличаются друг от друга. Но напоследок электрон делает вот что — отдав остаток энергии на нагрев коллектора, он способствует его разрушению. Действительно, когда ток идет, поверхность коллектора нагревается, в паузе — остывает. При нагреве и охлаждении возникают термические напряжения, в материале коллектора понемногу накапливаются дислокации, потом возникают трещины, и в итоге коллектор начинает разрушаться. Для уменьшения плотности мощности пучка перед коллектором он «распушается», «растаскивается» на большую площадь (см. рис.5).

На уровне хорошего детектива обо всем этом рассказано в прекрасной книге «Теплофизические процессы и электровакуумные приборы», написанной В.Ф.Коваленко и изданной в 1975 году издательством «Советское радио». Много хороших книг написано об электровакуумных приборах, много хороших книг написано о теплофизических процессах, но лучше этой — нет. Конечно, это мое личное мнение, и я его никому не навязываю. Любовь — это всегда личное мнение. И пусть все другие, кто десятилетиями работает в области ЭВП СВЧ, не обижаются. Во-первых, для того чтобы написать хорошую книгу, недостаточно быть прекрасным специалистом. Надо уметь изложить ясно, доступно, интересно, в общем — увлекательно. Нужно иметь свой взгляд на мир и на ЭВП СВЧ. Надо, наконец, просто захотеть написать книгу. И еще надо это сделать. Так же, как и любую работу, — надо захотеть сделать и надо сделать.

Мы остановились на том, что окна перегреваются и разрушаются из-за поглощения в них энергии электромагнитной волны. Казалось бы, созданием диэлектриков с очень малой проводимостью эту задачу можно решить. Увы, дракон оказался многоглавым. Электрон, ударяясь о любой материал, выбивает из него вторичные электроны. Ну и что? Пусть даже шальной электрон ударился в керамическое окно вывода энергии — ну выбьет он сколько-то вторич-

ных электронов, ну разлетятся они куда попало, и все. Увы, не все. Во-первых, выбьет он вторичных электронов довольно много — несколько штук. Во-вторых, раз окно это предназначено для вывода энергии, то, значит, вокруг него и в нем самом всегда есть сильное электромагнитное поле. Поле, заметьте, переменное. Вторичные электроны ускорятся этим полем, наберутся от него энергии, врежутся в керамику, выбьют из нее еще больше вторичных электронов, которые опять ускорятся полем, и пошло-поехало. Электронная лавина нарастает, энергия отнимается от электромагнитной волны и идет на нагрев окна. Такого издевательства — а оно называется высокочастотным вторично-электронным разрядом — не выдерживает самая высокотемпературная керамика.

Много сил и времени было потрачено на поиск материала и конструкции окон, допускающих вывод больших мощностей. Рекорд мощности клистрона 30 МВт (импульсная мощность, при длине импульса несколько мкс) продержался около 20 лет. Но в 1983 году в Стэнфордском университете был разработан клистрон мощностью 50 МВт, а еще через 2 года там же американские и японские специалисты сделали клистрон мощностью 150 МВт. Кроме всего прочего, оказался важным выбор антиэмиссионного покрытия для окна вывода энергии. Ни в одном виде спорта рекорды не бьются таким способом — после 20 лет превышение скачком в 1,7, а потом еще в 3 раза. Впрочем, такое и в технике бывает нечасто.

