

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ****ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТРИОДЫ БЕЗ ТОЧЕЧНЫХ КОНТАКТОВ****В. С. Вавилов****1. ВВЕДЕНИЕ**

В течение последних трёх лет быстрыми темпами развивается новая практически важная область применения полупроводников: усиление переменных токов кристаллическими триодами. Как известно, первыми из таких триодов были «транзисторы» с точечными контактами металл — германий (см., например, ^{1,2}). Ряд существенных недостатков делал область применения этих триодов довольно узкой. Кроме того, теория действия триодов с точечными контактами до настоящего времени не вышла за рамки качественных оценок и лишь частично подтверждённых опытом соображений (например, ³).

Основными недостатками кристаллических триодов с точечными контактами являются: очень высокий уровень шумов, не дававший возможности использовать их как элементы усилителей для радиоприёма, малая полезная мощность, обусловленная ничтожной площадью «точечного» контакта и максимальная рабочая частота, ограниченная несколькими мегациклами.

Ниже будет описан принцип действия и приведены данные германиевых триодов, работающих без точечных контактов и представляющих, в сравнении с описанными ранее, большой шаг вперёд.

2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ НОВОГО ТИПА ТРИОДА

Принципиальная схема бесконтактного кристаллического триода изображена на рис. 1. Искусственно созданные в полупроводнике резкие границы областей электронной (n) и дырочной (p) проводимости представляют собою выпрямляющие элементы в электрических цепях между эмиттером и базой (основанием) и между коллектором и базой⁴. В триодах типа «А» с точечными контактами соответствующую роль играли границы металл — полупроводник.

В отличие от кристаллических триодов типа «А», таким образом, выпрямление имеет место внутри кристалла, а не у поверхности его, в запиорном слое вблизи металлического острия. Все три соединения (отводы) от кристалла германия представляют собой невыпрямляющие омические контакты большой площади, нанесённые электролитическим путём.

Другим существенным отличием триодов типа « $n-p-n$ » от триодов типа «А» является то, что, во-первых, поток впущенных в германий носителей тока распространяется в основном

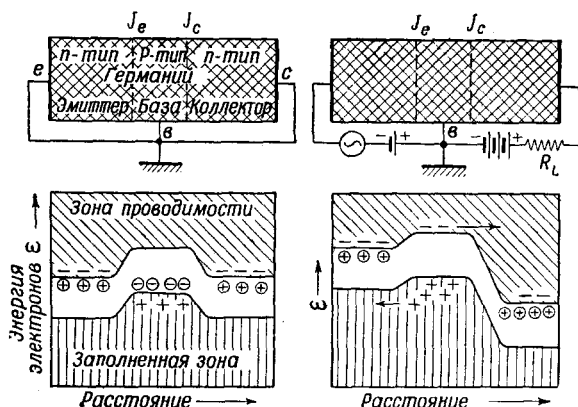


Рис. 1.

путём диффузии, а не дрейфа во внешнем электрическом поле. «Умножение» тока у коллектора (см. ^{1,2}), приводящее к положительной обратной связи и нестабильности триодов типа «А», не имеет места в «бесконтактных» триодах.

На рис. 1 внизу изображены энергетические зоны в кристалле германия, разделённом слоем с обратным типом проводимости. На левом рисунке приложенные извне потенциалы равны нулю; на правом рисунке приложенные потенциалы смещения превращают кристалл в «твёрдый усилитель» ⁵.

К выпрямляющей границе J_c , в этом случае, прикладывается смещение, соответствующее току в обратном направлении. Это направление таково, что электроны в «коллекторной» области типа n имеют малую потенциальную энергию и не могут преодолеть потенциальный барьер, имеющийся на границе с базой (областью с дырочной проводимостью). Аналогично этому, дырки задерживаются в центральном слое. Электроны в области эмиттера, однако, имеют возможность преодолеть невысокий потенциальный барьер и проникнуть в слой с дырочной проводимостью. Попад

в центральную область, электроны диффундируют направо; некоторые из них достигнут правой границы $p-n$ (J_c). Поток электронов через потенциальный барьер зависит от высоты барьера, которая может меняться за счёт потенциала смещения эмиттера при постоянном потенциале базы.

Если слой с дырочной проводимостью очень тонок, лишь небольшая часть электронов успеет рекомбинировать с дырками, проходя сквозь него (см. ^{6,7}). Электронный ток будет легко пропускаться слоем. Кроме того, если область эмиттера имеет проводимость большую, чем база, число электронов, преодолевающих потенциальный барьер слева направо будет превышать число дырок, преодолевающих соответствующий барьер в противоположном направлении. Напомним, что на рис. 1 энергии дырок откладываются вниз. Большая часть тока через левую границу J_e будет переноситься электронами.

В этом случае процессы, происходящие в полупроводниковом кристалле с прослойкой, имеющей обратный основному знак носителей тока, в сильной степени аналогичны тому, что имеет место в вакуумном триоде. Эмиттер соответствует катоду, база — области вблизи управляющей сетки и коллектор — аноду. В случае удачно выбранной геометрии триода и нужного соотношения проводимостей управляемый электронный ток, проникающий сквозь базу может значительно превышать ток сигнала, меняющий высоту потенциального барьера. Коэффициент усиления по току в таком триоде очень высок. Ввиду этого кристаллический триод типа $n-p-n$ может быть использован как триод с заземлённым катодом. При этом, в отличие от рис. 1, эмиттер заземляется, а сигнал подаётся на электрод b .

И в вакуумных триодах и в кристаллических триодах описываемого типа управление осуществляется взаимодействием двух видов электронного потока. Ток проводимости в металле сетки вакуумного триода управляет потоком электронов между проводочками сетки, обусловленным термоэлектронной эмиссией катода. В кристаллическом триоде поток дырок в базе изменяет разность потенциалов между эмиттером и базой и управляет потоком электронов сквозь слой, имеющий дырочную проводимость.

Прежде чем переходить к конкретным данным о работе нового типа кристаллических триодов, следует указать, что германиевые кристаллы со слоем проводимости обратного знака могут быть также использованы в качестве своеобразного «фотоумножителя». В этом случае электрод, присоединённый к базе, не играет роли. Как известно, в германии имеет место фотопроводимость в видимой и инфракрасной областях ^{1,8}. Если на поверхность кристалла вблизи одной из границ $n-p$ падает свет, освобождаемые им электроны и дырки ^{8,9} разделяются электрическим полем, в результате чего в базу течёт дырочный ток.

Эти дырки, накапливаясь в центральном слое, заряжают его положительно и этим понижают потенциальную энергию электронов в нём. В результате этого большее количество электронов преодолает потенциальный барьер и потечёт в область коллектора.

После того, как освещение кристалла прекращается, накопившийся заряд быстро исчезнет в результате диффузии дырок за пределы области p и их рекомбинации с электронами, а также за счёт рекомбинации в самом слое.⁴

Если слой с p -проводимостью очень тонок, а плотность электронов в области эмиттера велика, значительное число электронов (в сравнении с количеством дырок, проникающих к эмиттеру и рекомбинирующих) сможет преодолеть потенциальный барьер и пройти к коллектору. Усиление тока, как показано в⁵, пропорционально отношению проводимостей двух слоёв и обратно пропорционально толщине дырочного слоя.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ БЕСКОНТАКТНЫХ ТРИОДОВ

Триод типа « $n-p-n$ » представляет собою монокристаллическую пластинку германия, длиной около 5 мм и сечением порядка квадратного миллиметра с тремя механически прочно скреплёнными с поверхностью германия отводами (проволочками)¹⁰. Триод заключается в прочную пластмассовую оболочку, предохраняющую хрупкую поверхность кристалла. Наиболее интересным вопросом, остающимся, по литературным данным, неясным, является метод, которым создаётся прослойка с дырочной проводимостью. Известно (см., например,^{11,12}), что германий может быть сделан дырочным полупроводником путём ядерной бомбардировки альфа-частицами или быстрыми нейтронами. Ядерные реакции в теле кристалла приводят к возникновению «примесных центров» (атомов соседнего элемента периодической системы), которые, захватывая электроны из заполненной энергетической зоны, вызывают появление «дырок», переносящих заряд. В случае резко ограниченных пучков заряженных частиц достаточной энергии получение участков кристалла нужной конфигурации с изменённым знаком проводимости представляется вполне возможным. Другим способом получения резких границ $n-p$, лежащих в плоскости, является впускание в расплав, из которого медленным вытягиванием выращивается монокристалл, некоторого количества нужной примеси (например, галлия¹³). В одной из работ, посвящённых выпрямляющим свойствам границ $n-p$ в германии¹⁴, указывается, что такой метод дал хорошие результаты. Наконец, не исключена возможность получения изображённых на рис. 1 кристаллов путём сращивания двух кусков «элек-

тронного» германия, на поверхности одного из которых создан слой p -проводимости. Степень чистоты германия, применённого для триодов, чрезвычайно высока: времена жизни дырок в области коллектора, согласно⁶, достигали 300—400 микросекунд. Экспериментальные триоды изготовлялись с разными значениями проводимостей; по данным авторов типичными величинами проводимости в разных участках кристалла были: в области эмиттера — $100 \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$; в базе — $1 \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$, в области коллектора $0,1 \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$.

4. ХАРАКТЕРИСТИКА ТРИОДОВ

Статические характеристики экспериментального кристаллического триода изображены на рис. 2. Кривые подобного вида получаются следующим образом: в цепи эмиттера и коллектора включаются соответствующие источники тока; измеряются разности потенциалов, соответствующие разным значениям токов. Токи считаются положительными, если они втекают в эмиттер и коллектор, как показано на рис. 3. Потенциалы считаются положительными, если знаки их соответствуют рис. 3. Часть характеристик, соответствующая нормальному режиму усиления триода, изображена сплошными линиями. Из рис. 2 видно, какие токи и разности потенциалов должны иметь место для того, чтобы схема могла действовать как усилитель. Для триода, характеристики которого приведены на рис. 2¹⁰, любые положительные потенциалы смещения на коллектор в пределах, примерно, от 0,1 до 35 в находятся в рабочей области. Токи эмиттера на всех кривых отрицательны, т. е. ток идёт из эмиттера в источник, включённый между эмиттером и базой. Токи коллектора, соответствующие значениям I_c , отложенным по оси абсцисс, почти равны I_e . Так как I_c и I_e обратны по знаку, это значит, что большая часть тока, втекающего в коллектор, выходит через эмиттер, а ток в цепи базы очень мал.

Пусть к коллектору приложен постоянный положительный потенциал, например в цепь между c и b (рис. 1) включена батарея. Если в эмиттер входит «отрицательный» ток (также включена батарея и последовательное сопротивление), то ток коллектора может управляться током эмиттера. В данном образце триода ток мог меняться в пределах от 20 мка до 5 ма. Выбор величины потенциала и тока коллектора определяется мощностью, которую необходимо получить от триода. Чем больше эта мощность, тем больший ток и разность потенциалов должны даваться источником. Так как эффективность при работе в классе A (в линейной части характеристики, без отсечки)¹⁵ не может превышать теоретического предела, равного 50%, то мощность усиленного сигнала не может быть больше половины мощ-

ности, отдаваемой батареей. Например, при работе коллектора при 20 в и 2 ма выходная мощность (для не искажённой синусоиды) не может быть больше 20 мвт.

Из нижних кривых рис. 2 видно, какие разности потенциалов должны быть приложены в цепи эмиттера. Весь диапазон изме-

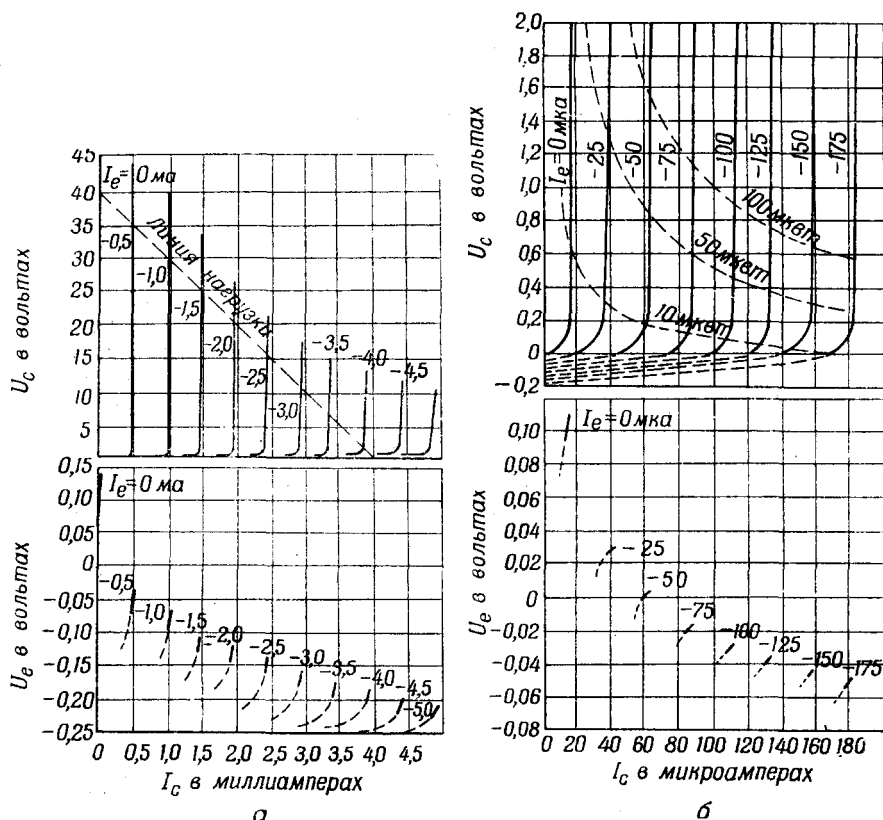


Рис. 2. Статические характеристики кристаллического триода типа $n-p-n$. а) — при сравнительно больших токах; б) — при очень малых токах.

нения U_e соответствует всего 0,4 в; рабочая область характеристик соответствует всего лишь нескольким милливольтам. Таким образом, при постоянном значении U_c очень малые изменения U_e вызовут значительное изменение тока коллектора; если же постоянным поддерживается ток коллектора, изменения U_c будут во много раз превосходить изменение потенциала эмиттера. Поэтому кристаллический триод может быть использован как усилитель, включаемый между источником тока с малым

сопротивлением и нагрузкой, имеющей высокое сопротивление; согласно¹⁰ усиление по напряжению в этом случае может достигать до 10 000.

При усилении переменного тока в качестве источника «тока смещения» эмиттера может быть включена батарея с последова-

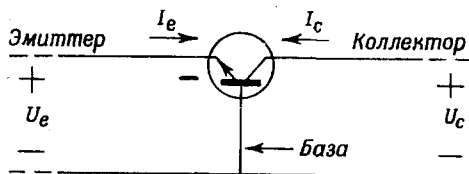


Рис. 3.

тельным сопротивлением. Если смещение превышает падение потенциала в цепи эмиттера, равное нескольким сотым вольт, ток I_e почти равен напряжению батареи, делённому на последовательно включённое сопротивление.

5. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ (ЭФФЕКТИВНОСТЬ)

В случае больших амплитуд сигнала на входе и омической нагрузки рабочая точка будет двигаться вдоль прямой линии (см. верхние кривые рис. 2, а). Нагрузочная линия в данном случае соответствует 10 000 Ω во внешней цепи. Так как «коллекторные» характеристики представляют собой равноотстоящие прямые, мгновенные значения U_c могут колебаться в пределах почти от 0 до $2 U_c$ (например, при коллекторном напряжении 20 в, от 0,1 до 39,5 в, чему соответствует эффективность в 48,5% из 50%, возможных теоретически. В некоторых экземплярах триодов эффективность может быть ещё большей. Расчёты эффективности были основаны на предположении о синусоидальных колебаниях тока в цепи эмиттера. Однако сопротивление эмиттера несколько зависит от тока I_e ; ввиду этого источник тока в цепи эмиттера для получения больших эффективностей и малых искажений должен иметь большое сопротивление.

При работе в области сигналов малой амплитуды кристаллические триоды дают достаточные усиления при гораздо меньших токах и напряжениях, чем в приведённом выше примере. Это объясняется тем, что и в области очень малых потенциалов и токов характеристики остаются прямолинейными (рис. 2, б). Для работы при малых сигналах достаточны U_c около 0,1 в и ток кол-

лктора, слегка превышающий 10 $\mu\text{ка}$. Затрачиваемая мощность в этом случае составляет всего несколько микроватт. Эта мощность в несколько тысяч раз меньше мощности, затрачиваемой на нагрев катода в вакуумной усилительной лампе.

6. СХЕМА УСИЛИТЕЛЯ С ЗАЗЕМЛЁННЫМ ЭМИТТЕРОМ

Возможные варианты схем усиления и соединения кристаллических триодов в многокаскадных схемах довольно многочисленны. Наиболее выгодной представляется схема с заземлённым эмиттером (рис. 4). Усиление по мощности в этом случае достигает 50 дб . Проблема соединения в каскады упрощается тем, что входное сопротивление несколько выше, чем в схемах с заземлённой базой, а выходное — значительно ниже (соответственно, несколько сот ом и несколько сот килоом). Усиление порядка 30 дб на каскад возможно без применения межкаскадных понижающих трансформаторов.

Предположим, что коллектор соединён через обмотку трансформатора с источником постоянного напряжения (рис. 4, а). Так как U_c составляет доли вольта, потенциал коллектора будет почти равен внешнему напряжению. Если к базе не приложено постоянного смещения, база находится при потенциале относительно земли, по абсолютной величине равном U_e , и ток коллектора в точности равен току эмиттера.

В некоторых случаях применения триодов, когда необходимо сократить потребляемую мощность, возможно видоизменение схемы (рис. 4, б). Между базой и землёй включается сопротивление; так как самоустанавливающийся потенциал базы относительно земли положителен, ток в цепи базы имеет нужное направление для того, чтобы снизить ток коллектора. Для увеличения тока коллектора может быть использована схема рис. 4, в, в которой

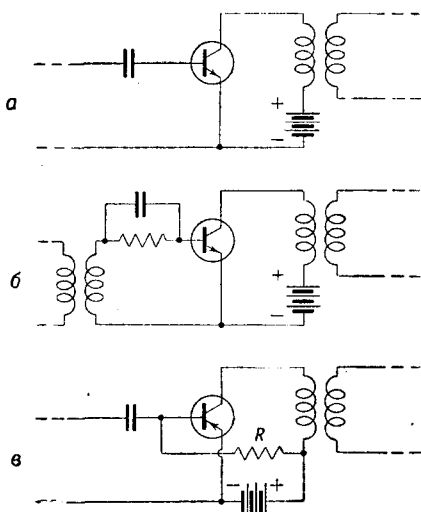


Рис. 4. а) — одна из схем усилителя с заземлённым эмиттером; б) — видоизменение схемы а для меньших коллекторных токов; в) — видоизменение схемы а для больших коллекторных токов.

между положительным полюсом батареи и базой включено высокое сопротивление. Другие варианты схем включения триода, как, например, каскад с заземлённым коллектором, представляющие интерес для практических применений, рассмотрены в ¹⁰.

7. ЗАВИСИМОСТЬ РАБОТЫ ТРИОДОВ ОТ ЧАСТОТЫ И УРОВЕНЬ ШУМОВ

Из теории кристаллических триодов типа $n-p-n$ следует ⁵, что предельная частота сигнала, при которой возможно усиление, зависит от геометрии триода и физических свойств германия, применённого для его изготовления.

Как следует из принципа действия триода, электроны, входящие в слой с p -проводимостью со стороны эмиттера, проходят сквозь этот слой путём диффузии; на прохождение соответствующего пути затрачивается некоторое (очень малое) время. Если бы все электроны проходили p -слой за одно и то же время, это вызвало бы лишь запаздывание сигнала на выходе относительно входного сигнала. В действительности, всегда имеет место разброс времён прохождения слоя электронами; если этот разброс становится соизмеримым с периодом сигнала, усиление спадает. Частота f_{ca} , при которой начинают сказываться времена диффузии электронов, обратно пропорциональна квадрату толщины p -слоя и, следовательно, быстро возрастает при уменьшении толщины слоя. У экспериментальных триодов, описанных в ⁵ и ¹⁰, f_{ca} достигает 5—20 мГц.

Другой причиной, влияющей на работу кристаллических триодов при высоких частотах, является ёмкость границы J_e . Можно показать, что ёмкость границы эмиттер—база ограничивает рабочую область частот частотой f_{ce} , приблизительно равной f_{ca} .

Третьей независимой причиной, ограничивающей область рабочих частот, служит ёмкость границы база—коллектор. Германий n -типа с одной её стороны и германий p -типа—с другой ведут себя как пластины конденсатора. Так как толщина границы очень мала, эквивалентная ёмкость может достигать значительной величины.

Если триод применяется как усилитель в схеме с заземлённым эмиттером, для описываемых образцов, путём подбора оптимальных параметров схемы можно было добиться следующих коэффициентов усиления: при 11 кГц—50 дБ, при 100 кГц—41 дБ и при 940 кГц—31,4 дБ. Таким образом вполне возможна работа триодов в качестве усилителей в области радиочастот.

Уровень шумов «транзисторов» типа «А» с точечными контактами, как известно, приблизительно в 1000 раз выше, чем

у современных вакуумных триодов^{2,3}. Триоды типа $n-p-n$ имеют уровень шумов на несколько порядков величины ниже. В отдельных образцах, согласно данным авторов, уровень шумов в полосе 1000 $гц$ колебался от 8 $дб$ до 25 $дб$, т. е. в некоторых случаях был близок к уровню шумов в современных приёмно-усилительных пентодах. Так же как в кристаллических триодах типа «А», уровень шумов падает с частотой (приблизительно, на 11 $дб$ при увеличении частоты в 10 раз). С уменьшением толщины p -слоя уровень шумов также уменьшается. В первом приближении наблюдавшийся уровень шумов согласуется с теорией возникновения шумов, обусловленных рекомбинационными процессами¹⁶. Согласно этой теории, каждый элемент объёма представляет собою источник шума, причём квадрат «шумового тока» пропорционален квадрату отклонения концентрации «внесённых» носителей тока от её нормального значения. В применении к триодам типа $n-p-n$ падение уровня шумов примерно в 100 раз в сравнении с транзисторами типа «А», согласно этой теории, объясняется различием в геометрии триода и плотности тока в полупроводнике.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В заключение нам кажется полезным подытожить основные свойства новых триодов и привести некоторые дополнительные данные о них, не упоминавшиеся выше:

1. Относительно низкий уровень шумов: в большинстве триодов уровень шумов не превышает 10—20 $дб$ в полосе 1000 $гц$.

2. Высокая стабильность работы. Входное и выходное сопротивления триодов всегда положительны как в схемах с заземлённым эмиттером, так и в случае заземлённой базы или коллектора. Это даёт полную свободу выбора наиболее удобной схемы включения и позволяет в широком диапазоне варьировать входные и выходные сопротивления каскадов усилителя.

3. Большие коэффициенты усиления, достигающие 100—300 на каскад.

4. Возможность усиления сигналов мощностью по крайней мере до 2 $вт$.

5. Высокая эффективность. Благодаря тому, что статические характеристики очень близки к идеальным, при усилении в режиме А удаётся практически получить эффективность 48—49% из 50%, возможных теоретически. При усилении с отсечкой (режимы В и С) эффективность может быть ещё большей.

6. Механическая прочность и малые габариты. Германиевый кристалл триода заключается в твёрдую «бусинку» диаметром около 5 $мм$, внутрь которой входят 3 проволоки, прочно скреплённые с поверхностью кристалла.

7. Отсутствие микрофонного эффекта при сотрясении.

8. Ограниченный сверху диапазон рабочих частот. Ёмкость коллектора ограничивает область максимально достижимых коэффициентов усиления звуковыми частотами. Однако при правильном выборе параметров схемы за счёт некоторого снижения усиления удастся получить плоскую частотную характеристику по крайней мере до 1 Мгц.

9. Необычайно малое потребление мощности источников питания. Как пример, в¹⁰ упоминается генератор звуковых частот, для питания которого необходимо 6 мка при разности потенциалов в 0,1 в, т. е. мощность в 0,6 мквт. Напомним, что на нагрев катода обыкновенной приёмно-усилительной лампы затрачивается мощность в миллион микроватт или ещё больше.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. «Кристаллические детекторы», Советское Радио, 1950 г., дополнительные главы (А. В. Ржанов).
2. В. С. Вавилов, УФН **40**, 120 (1950).
3. Bardeen and Brattain, Phys. Rev. **75**, 1208 (1949).
4. W. Shockley, Bell Syst. Techn. Journal **28**, 435 (1949).
5. W. Shockley, M. Sparks, G. Teal, Phys. Rev. **83**, 151 (1951).
6. W. Shockley и др., Bell Syst. Techn. Journal **28** (1949).
7. W. Shockley, Pearson and Haynes, Phys. Rev. **81**, 835 (1951).
8. Ф. Ф. Волькенштейн, «Электропроводность полупроводников». Гостехиздат (1947).
9. J. N. Shive, Phys. Rev. **76**, 575 (1949).
10. R. Wallace and W. Pietenpol, Proc. Inst. Radio Engineers **39**, 753 (1951).
11. Lark-Horovitz и др., Phys. Rev. **82**, 763 (1951).
12. K. McKay, Phys. Rev. **82**, 329 (1951).
13. Teal, Sparks and Buehler, Phys. Rev. **81**, 637 (1951).
14. W. Pietenpol, Phys. Rev. **82**, 120 (1951).
15. В. Ф. Власов, «Электровакuumные приборы». Связьиздат (1949).
16. W. Shockley, «Electrons and Holes in Semiconductors», N. Y., 1950 г.