

## Burning Amp 2022 – Простые усилители мощности SIT своими руками

### Нельсон Пасс

Возможно, удивительно отметить, что статический индукционный транзистор (SIT) был изобретен в Японии в 1950 году и является одним из старейших полупроводников, предшествовавшим даже Jfet и Mosfet. В 1970-х годах он был популяризирован Yamaha и Sony под названием VFET и использовался в схемах усилителей этих компаний до 1980-х годов. После этого времени VFET исчезли с массового рынка, но по-прежнему пользовались высокой репутацией среди искушенных аудиофилов.

Транзисторы SIT продолжали производиться для промышленного использования из-за их уникальных характеристик, в первую очередь японской компанией Tokin. К сожалению, Tokin прекратила производство этих деталей несколько лет назад. Между тем, одиннадцать лет назад, в разговоре с руководителем отдела НИОКР в SemiSouth, мне предложили возможность заказать партию транзисторов SIT из карбида кремния, и, несмотря на огромную стоимость, я с радостью воспользовался этой возможностью.

Несколько месяцев спустя я обнаружил, что владею почти 2000 транзисторами, которые использовались в серии из трех усилителей, креативно названных SIT-1, SIT-2 и SIT-3. К этому времени я израсходовал свой запас, и, к сожалению, SemiSouth прекратил свою деятельность после моей первоначальной покупки.

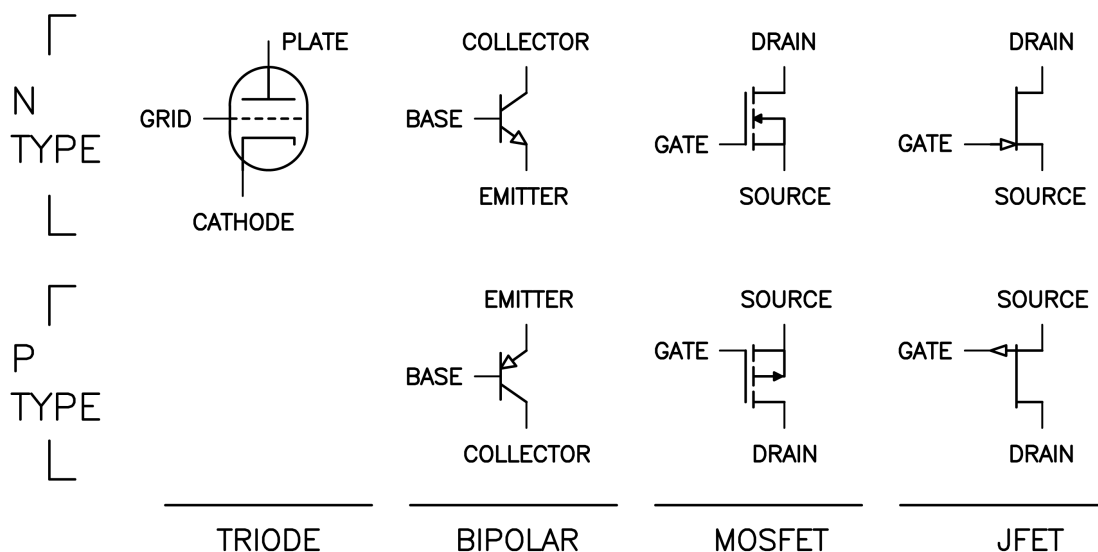
Позже я обнаружил источники транзисторов Sony Vfet, а также SIT-устройств, изготовленных Tokin в форме «New Old Stock» (NOS), и начал играть с этими деталями. Я использовал детали Sony в «Sony 40» «Юбилейный памятный усилитель», а также в проекте DIY Sony VFET, одноканальном конструкторском комплекте класса A, предлагаемом DiyAudio.com.

Я также начал приобретать инвентарь Tokin 2SK180, 2SK182es и THF-51 и начал изучать конструкции, основанные на этих больших промышленных SIT. Чуть больше года назад я открыл ветку на diyAudio.com под названием «Пока они есть...», советуя любителям DIY приобретать то, что осталось от этих транзисторов, для использования в усилителях мощности звука своими руками, обещая разработать для них несколько конструкций. Одиннадцать сотен постов и 160 000 просмотров спустя, это продолжение. На момент написания этой статьи вы все еще можете купить эти детали Tokin на Ebay у надежного продавца Watanabetomoaki, хотя цена продолжает расти.

Я здесь для того, чтобы объяснить, зачем вам могут понадобиться эти детали, и дать основные сведения о том, как их можно использовать для создания высококачественных усилителей мощности звука.

## Основы усилительных устройств

Я хотел бы начать с обзора основных усилительных устройств, которые мы используем, чтобы подчеркнуть их сходства и различия. Вот диаграмма, показывающая триодную лампу и шесть различных типов транзисторов. Все они имеют три вывода, которые выполняют схожие функции. В случае триода у нас есть пластина, катод и сетка:



Для биполярного транзистора выводы коллектора, эмиттера и базы являются соответствующими выводами. Для полевых транзисторов (FET) у нас есть сток, исток и затвор.

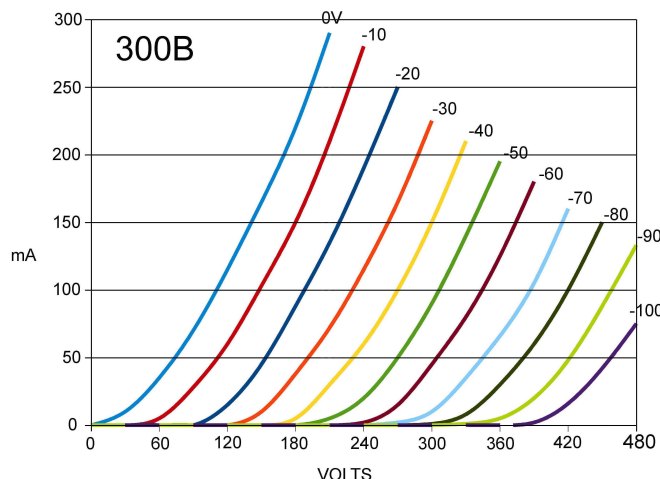
Для трубок ток, текущий от пластины к катоду, контролируется напряжением между сеткой и катодом. Когда напряжение сетки становится положительным, большему току разрешено течь от пластины к катоду. Аналогично для полевых транзисторов ток контролируется напряжением затвор-исток. У биполярного транзистора ток коллектор-эмиттер контролируется меньшим током, текущим от базы к эмиттеру.

Вы заметите, что устройства типа P инвертированы относительно типов N. Применяются те же идеи, за исключением того, что полярности напряжения и тока P инвертированы. Трубки типа P, вероятно, встречаются во вселенной антиматерии.

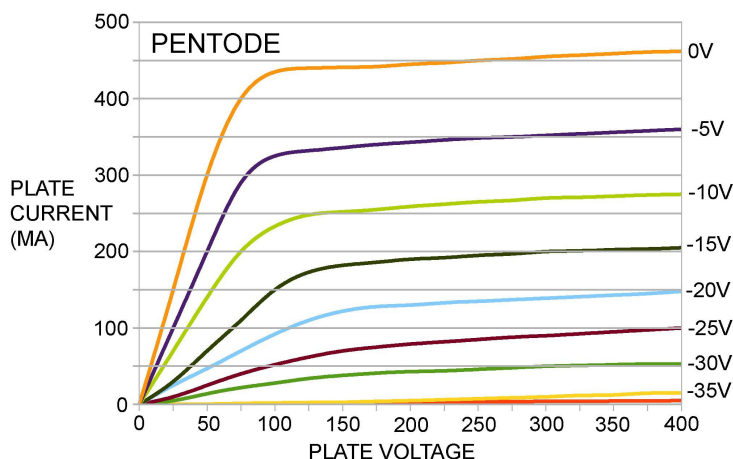
Чтобы оценить особое очарование SIT-транзисторов, мы хотим знать, что ток через эти устройства является функцией не только управляющих напряжений, но и напряжения во всем устройстве. Например, ток триодной трубки также зависит от напряжения анод-катод — по мере увеличения этого напряжения увеличивается ток. Это справедливо для всех этих устройств в некоторой степени.

Ниже приведен ряд кривых, иллюстрирующих важный момент.

Здесь у нас есть график кривых триода, в данном случае почтенного 300B. Горизонтальная ось - это напряжение анода к катоду, а вертикальная ось - ток, текущий от анода к катоду. Вы можете увидеть семейство кривых, представляющих поведение трубки для одиннадцати различных напряжений сетки к катоду. Здесь важны типы кривых (вогнутые или выпуклые) и степень, в которой ток изменяется в зависимости от напряжения анода к катоду.



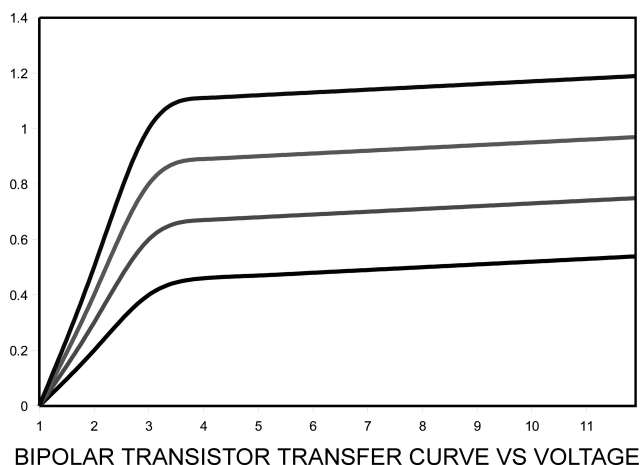
В лампах это изменение обусловлено тем, что известно как анодное сопротивление. Эта характеристика особенно важна для производительности триодов и SIT. Здесь вы видите ту же кривую для другого типа лампы, пентода.



Он имеет гораздо более высокое сопротивление пластины, чем триод из-за другого расположения с дополнительными элементами сетки. Вы можете увидеть разницу в сглаживании кривых, где меньше изменений с напряжением пластины.

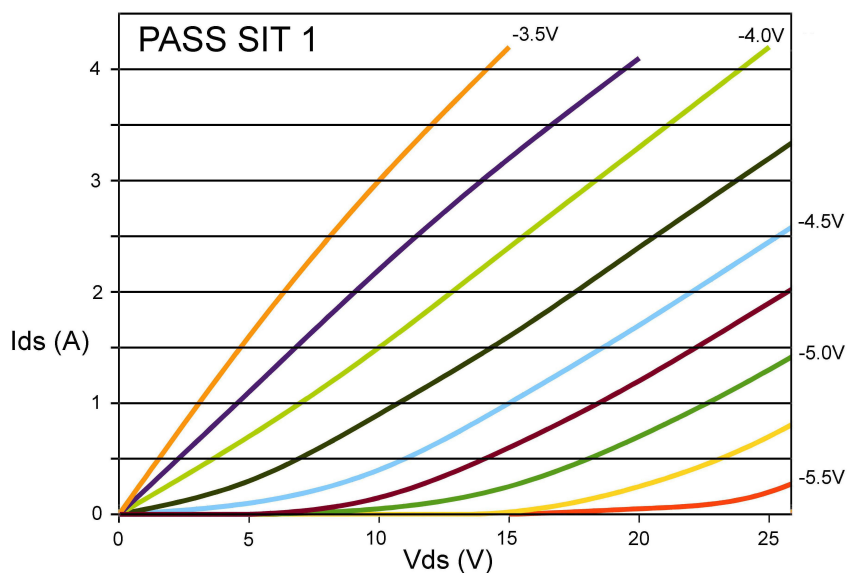
Также кривые имеют выпуклую форму вместо вогнутой. Это имеет преимущества во многих приложениях, хотя некоторые аудиофилы предпочитают звук триодов.

Вот график для биполярного транзистора. Он похож на пентод, с выпуклыми сглаженными кривыми и характеристикой высокого импеданса.

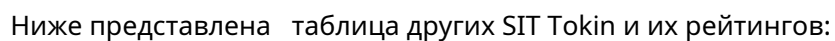


Ниже приведены кривые для Mosfet, аналогичные Pentode и Bipolar. Все эти усилительные устройства, как правило, игнорируют эффекты изменения напряжения на силовых выводах. Это часто является большим преимуществом по сравнению с Triodes и SIT, но это ограничивает вид легкой манипуляции характером, который поставляется с этими деталями.

Наконец, мы переходим к кривым для транзистора SIT-1. Сопротивление стока намного ниже, чем у других транзисторов, что видно по более высоким наклонам кривых, и мы также замечаем, что кривые имеют вогнутую форму, как у триода.



У нас также есть кривые для 2SK77B, обновленной версии оригинального Yamaha 2SK77 VFET. Он имеет более высокий ток, высокий коэффициент усиления по напряжению и мощность.

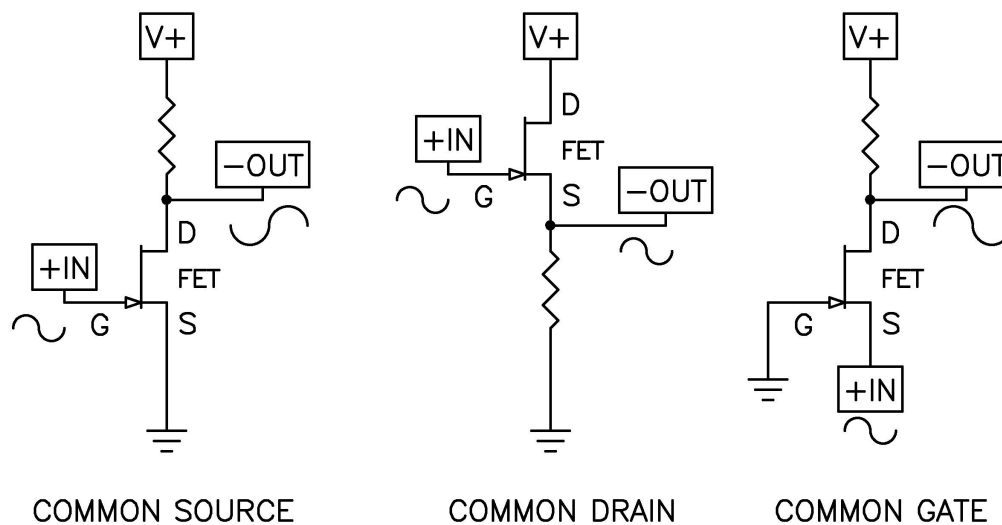


Term Model	Storage Temp. range	Gate-to-Source Voltage	Gate-to-Drain Voltage	Drain Current	Total Power-Dissipation	Mounting Site Temp.	Gate-ON Frequency	Drain-to-Source-ON Resistance	Turn-ON Time	Turn-OFF Time	
2SK180	- 50 ~ + 150°C	70 V	600 V	20 A	300 W	15*	10 MHz	1.5 Ω max.	200 ns*	250 ns*	
2SK181			800 V					2 Ω max.			
2SK182E			600 V	60 A	500 W		10 MHz*	1.0 Ω max.	250 ns*	300 ns*	
2SK183E			800 V								
2SK183HE			1200 V								
2SK183VE			1500 V	20*							
2SK182			600 V	60 A	1000 W	15*	10 MHz*	1.0 Ω max.	250 ns*	300 ns*	
2SK183			800 V								
2SK183H			1200 V								
2SK183V			1500 V								
TS300			600 V	200 A	3000 W	15*	7 MHz*	0.3 Ω max.	350 ns*	350 ns*	
TS300H			1200 V	180 A				0.5 Ω max.			
TS300V			1500 V					20*			
THF-50			50 V	450 V	30 A	400 W	15*	50 MHz*	0.6 Ω max.	50 ns* max.	50 ns* max.
THF-51				600 V					0.7 Ω max.		
THF-52	800 V	1.0 Ω max.									
THF-53	1000 V	1.2 Ω max.									
TM II-M	- 50 ~ + 125°C	70 V	600 V	60 A	500 W × 2	15*	10 MHz*	1.0 Ω max.	250 ns*	300 ns*	
TM II-N			800 V								
TM II-H			1200 V								
TM II-V			1500 V			20*					

2SK180 рассчитан на 600 вольт, 20 ампер и 300 ватт, что довольно много, но THF-51s имеет 600 вольт, 30 ампер и 400 ватт. 2SK182es имеет более высокие показатели: 600 вольт, 60 ампер и 500 ватт, а TS300 достигает 1200 вольт, 200 ампер и 3000 ватт.

## РЕЖИМЫ РАБОТЫ

Вот мы с некоторыми замечательными частями, и мы хотим поиграть с ними. Здесь показаны три основные рабочие схемы:



Общий источник — это место, где сигнал поступает в затвор и создает напряжение и ток на стоке. Он инвертирует фазу сигнала в этом процессе.

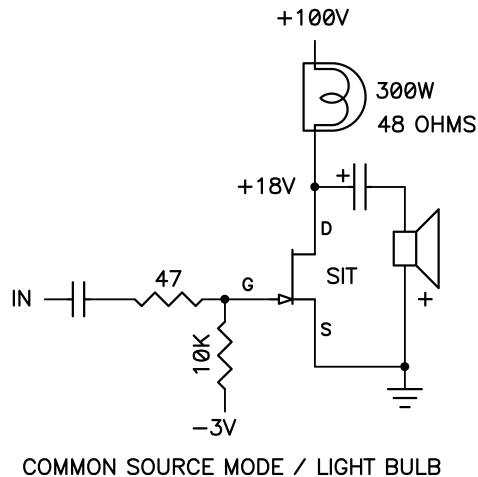
Режим общего стока, также известный как повторитель, не усиливает напряжение, а просто подает ток без инверсии фазы.

Схема Common Gate не имеет усиления по току, но может обеспечивать усиление по напряжению, опять же без инверсии фазы.

Все три режима обычно встречаются в аудиосхемах, но здесь мы рассмотрим только два из них: общий источник и общий сток.

Характеристики SIT делают их необычайно полезными в простых аудиоусилителях, и мы рассмотрим их работу как усилителей мощности, работающих в одноклассе А без отрицательной обратной связи. Сначала мы рассмотрим работу с общим источником.

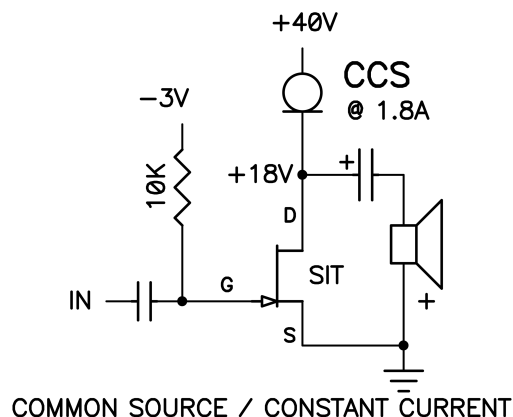
Поскольку SIT может обеспечить некоторое усиление с высоким входным импедансом и довольно низким выходным импедансом с достаточно низким искажением, его можно использовать в некоторых очень простых усилителях. Вот усилитель, состоящий из SIT, двух источников питания, двух резисторов и двух конденсаторов.



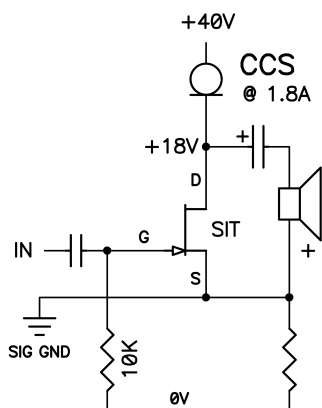
Сигнал поступает в Gate и выходит из Drain. Конденсаторы блокируют постоянный ток для источника сигнала и громкоговорителя, резистор 47 Ом стабилизирует схему на очень высоких частотах, а резистор 10 кОм обеспечивает смещение примерно -3 В для Gate, что устанавливает рабочую точку. Поскольку схема инвертирует фазу сигнала, динамик + подключен к заземлению схемы.

Результатом является усилитель, который прекрасно работает как эффективный громкоговоритель. С другой стороны, он выдает чуть больше 5 Вт при стоимости потребления в 170 Вт, с 30 Вт рассеивания в SIT и остальной частью в лампочке. С другой стороны, он имеет приятный звук и является отличным предметом для разговора.

Здесь лампочка заменена активным источником постоянного тока на 1,8 А. Он обеспечивает практически ту же производительность, но рассеивает всего 72 Вт.

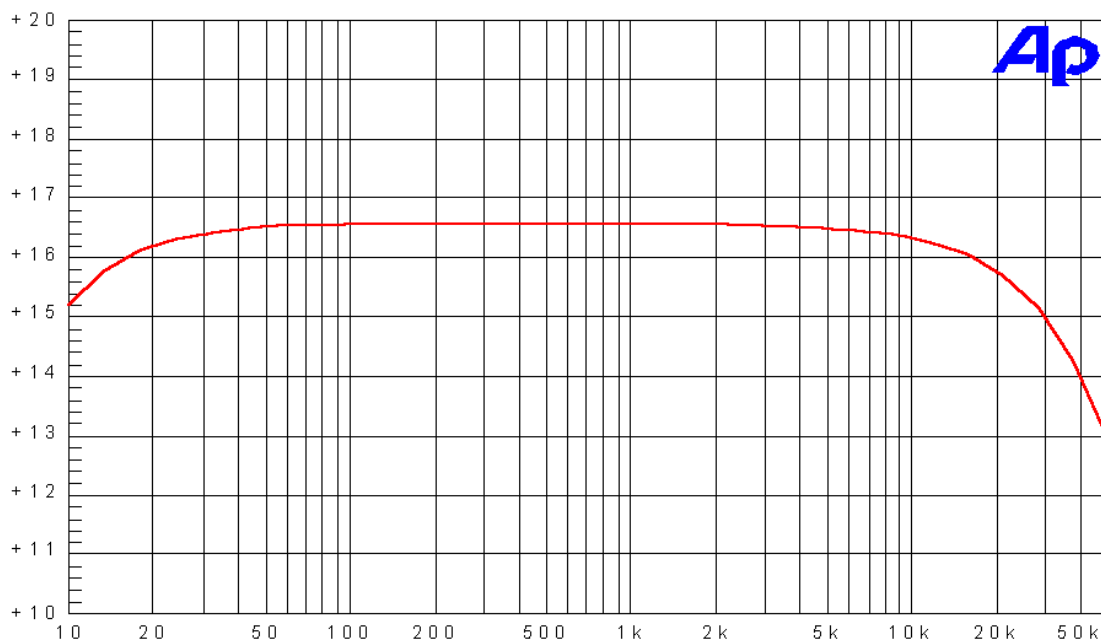


Другой вариант, который устраняет необходимость в отдельном источнике напряжения смещения, использует резистор, который подключается между контактом Source и тем, что раньше было Ground, чтобы генерировать напряжение смещения. При 1,8 А, что-то меньше 2 Ом, скорее всего, справится с этой задачей. Формируется новое заземление входного сигнала, и оно отделено от выходного заземления, которое, как вы можете вспомнить, подключено к положительному выводу динамика.



COMMON SOURCE / CONSTANT CURRENT  
WITH PASSIVE BIAS CIRCUIT

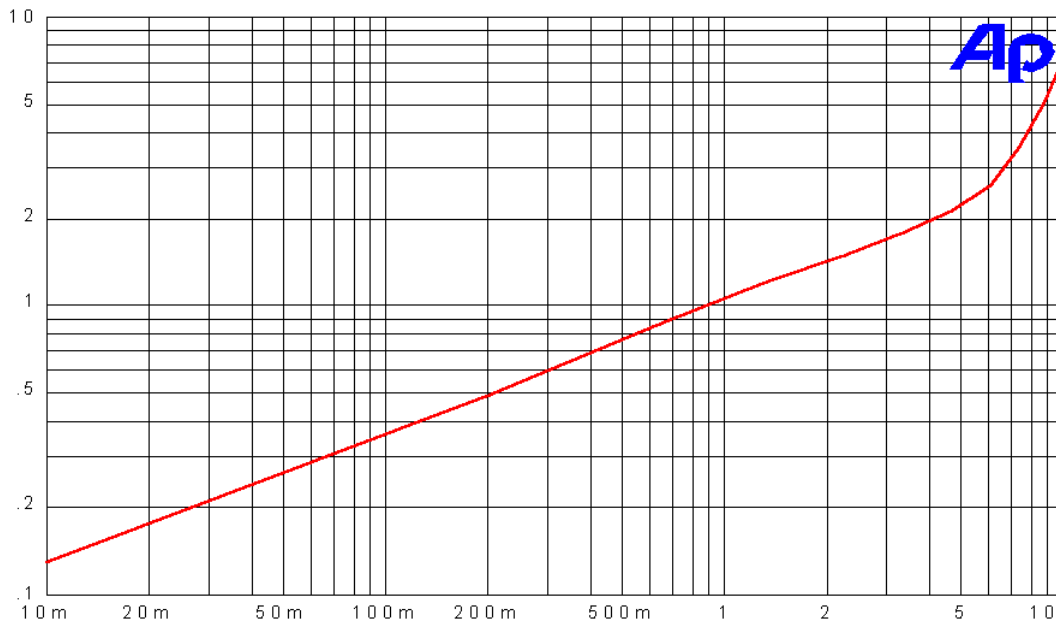
Все три схемы дают примерно одинаковую производительность. Здесь рабочая точка выбирается не для минимально возможного искажения, а для искажения, где отрицательная фаза 2-й гармонической составляющей доминирует, поскольку это, по-видимому, наиболее субъективно популярная настройка. Однако вы можете установить ее по своему усмотрению. Здесь вы видите отклик усиления схемы, работающей от источника 50 Ом и нагрузки 8 Ом.



THF51S COMMON SOURCE FREQUENCY RESPONSE



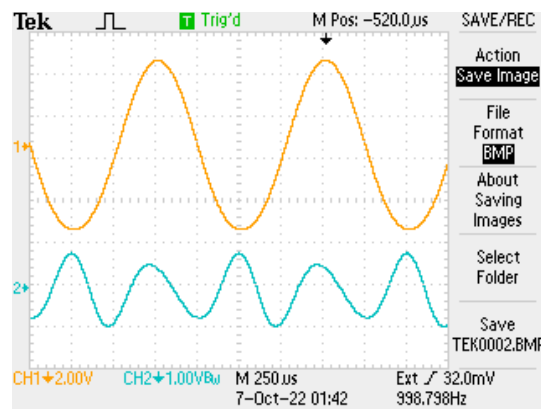
Примечательно, что производительность также очень похожа во всем диапазоне SIT-1, 2SK180, 2SK182es и THF-51s, поэтому я покажу только один набор кривых, которые являются типичными. У 2SK180es немного больше усиления, но THF-51 немного быстрее и т. д. Вот искажение в зависимости от мощности на 8 Ом. Коэффициент затухания для 8 Ом составляет около 3 или 4.



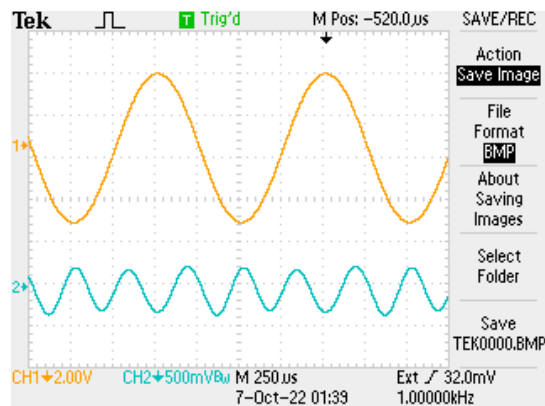
**2SK182ES COMMON SOURCE DISTORTION VS OUTPUT**

Одно из удовольствий работы с SIT — это возможность регулировки характера искажения. Регулируя напряжение и/или точки смещения тока, балансируя противоположные крутизну и стоковое сопротивление, вы можете изменять линию нагрузки транзистора и изменять амплитуду и характер 2-й гармоническое содержание.

Здесь вы можете увидеть основную гармонику и искажение в осциллограммах, где основная гармоника показана оранжевым цветом, а увеличенная волна искажения — синим. Сначала «положительная фаза» 2-й где искажение положительно на всех основных пиках.

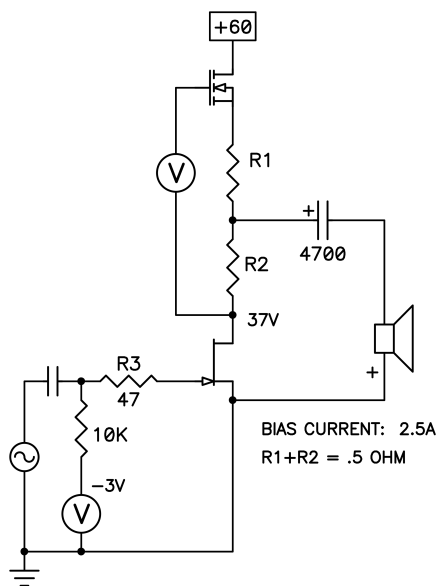


Снижение напряжения сток-исток выводит нас на золотую середину, показывая отмену 2й, оставив только 3<sub>рд</sub>гармонический.



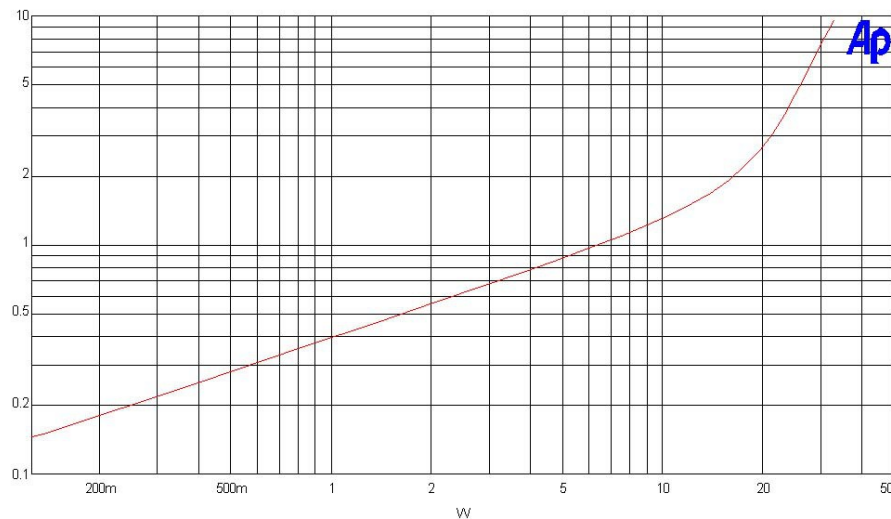
Понижая  $V_{ds}$  еще больше, мы получаем 2й гармонический обратный, но с выравниванием «отрицательной фазы». Если хотите, можете поставить потенциометр в цепь смещения и настроить его ручкой на передней панели, как я сделал с усилителем SIT-1.

Вот забавный прием, который вы можете использовать — загрузка SIT с помощью так называемого «мю-последователя».



Здесь мощный МОП-транзистор смещен напряжением, чтобы действовать как источник переменного тока, который считывает выходной ток и увеличивает его на несколько крат, обычно около 50%, но регулируется соотношениями  $R1$  и  $R2$ . При  $R2 = 0$  он действует как источник постоянного тока. При  $R1 = R2$  он вносит около  $\frac{1}{2}$  выходного тока, а при  $R1$  меньше  $R2$  он начинает подавать большую часть выходного тока. Это повышает эффективность схемы, а также позволяет легко регулировать линию нагрузки, которую испытывает SIT, и, таким образом, количество и тип искажений.

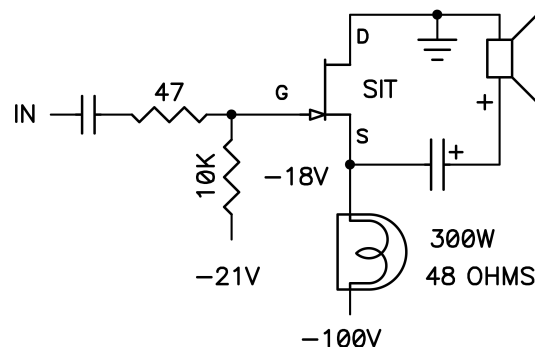
Как видно здесь, это может значительно снизить искажения и увеличить максимальную мощность примерно в 4 раза в случае  $R1=R2$ .



THF51S CS DISTORTION 8 OHMS

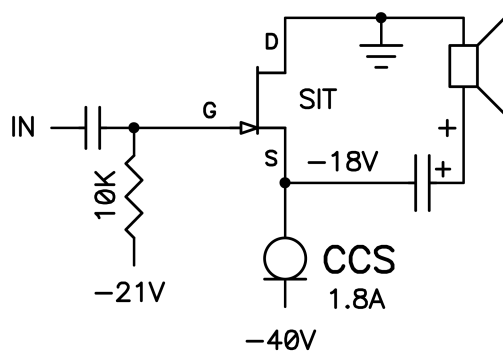
Теперь рассмотрим другой режим — Common Drain. Режим Common Source довольно приятен и отлично эмулирует однотактные ламповые усилители, но если вы уже можете обеспечить необходимое усиление напряжения на входе и хотите иметь гораздо меньшие искажения, более широкую полосу пропускания и более высокий коэффициент затухания, вам определенно следует выбрать режим Common Drain, в котором SIT действует как повторитель, генерируя только усиление тока.

Как и прежде, мы начинаем с лампочки. Мы используем те же детали, но по-другому скомпонованные с инвертированным источником питания и измененным напряжением смещения -21 вольт, чтобы получить напряжение на выводе Source -18. Поскольку схема Common Drain на этот раз не инвертирует сигнал, мы подключаем положительный вывод динамика к активной выходной клемме. Пропускная способность значительно улучшается, коэффициент затухания увеличивается с 3 до 30, а искажения уменьшаются примерно в 10 раз.



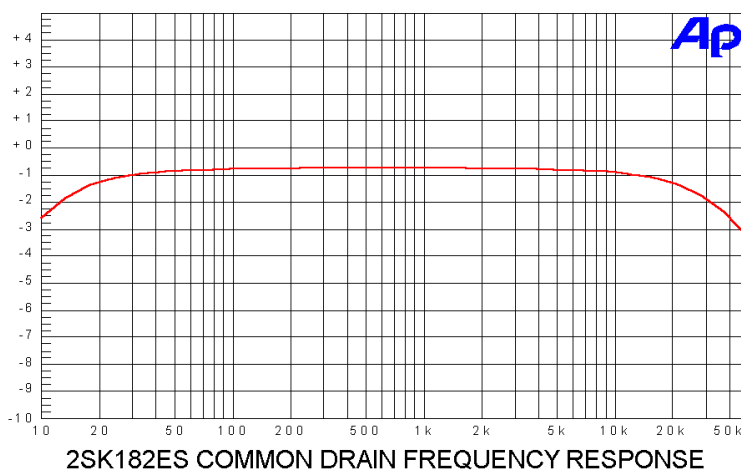
COMMON DRAIN MODE / LIGHT BULB

Вот эквивалентная схема с источником постоянного тока. Опять же, производительность примерно такая же, как у версии с лампочкой, но более эффективная.

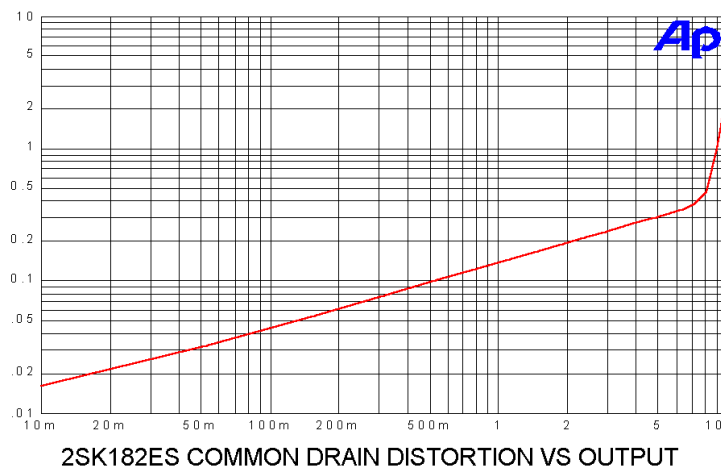


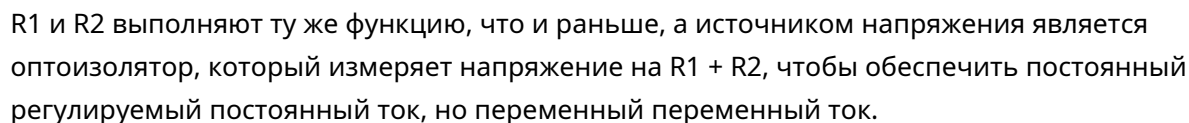
COMMON DRAIN / CONSTANT CURRENT SOURCE

Вот кривая отклика. У меня немного лучшая полоса пропускания, но нет усиления напряжения. Это повторитель, и усиление напряжения обычно должно исходить из предыдущей схемы.



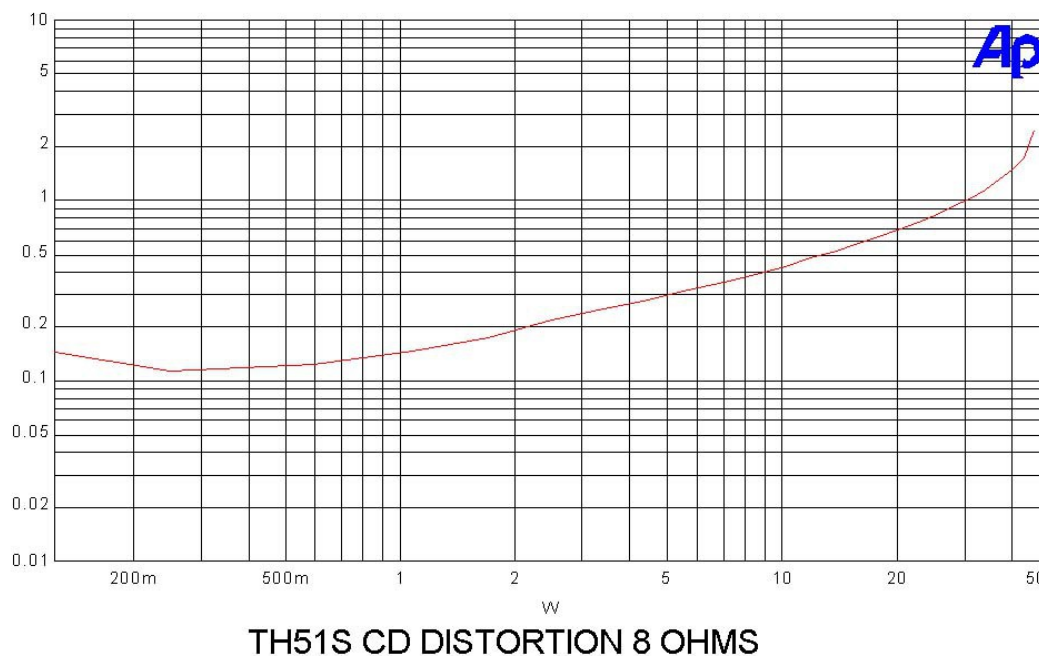
А вот кривая искажения в зависимости от мощности, где мы видим значительное улучшение.



[illegible]

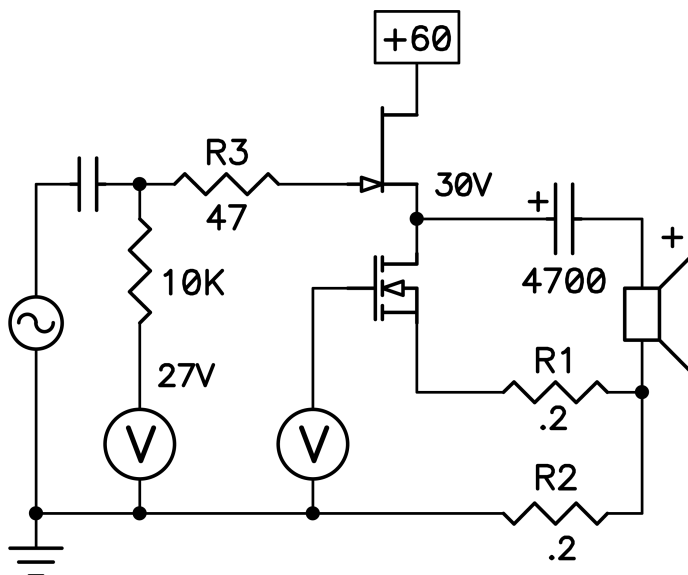
A line graph showing the relationship between TH51S CD Distortion (Y-axis) and W (Ohms) (X-axis). The Y-axis is logarithmic, ranging from 0.01 to 10. The X-axis is also logarithmic, ranging from 200m to 50. The curve starts at approximately 0.15 at 200m, dips slightly to 0.1 at 300m, then rises steadily to about 2.5 at 50 Ohms. A blue 'Ap' logo is visible in the top right corner of the graph area.

W (Ohms)	TH51S CD Distortion
200m	0.15
300m	0.11
500m	0.12
1	0.15
2	0.20
5	0.35
10	0.50
20	0.80
50	2.5



Обратите внимание, что вы можете инвертировать полярности источника питания в этой конкретной схеме так, чтобы сток SIT был на земле, а сток Mosfet на V-, и таким образом можно избежать попадания шума источника питания на выход, в противном случае вам понадобится тихий положительный источник. Результат будет похож на первые два примера общего источника, показанные ранее, но смещенный повторителем Mu/

Наконец, вот альтернатива последней схеме, которая обеспечивает примерно такую же производительность, вариант MUFF, в котором используется N-канальный МОП-транзистор.



Это привлекательно, поскольку проще/дешевле купить хорошие высокоомощные N-канальные МОП-транзисторы, чем P-канальные. Схема смещения для МОП-транзистора может использовать схему оптоизолятора, показанную ранее.

В заключение, вы можете повторно использовать SIT-транзисторы для создания всех этих примеров, если хотите, и звуковые впечатления стоят усилий. Tokin SIT прочные и надежные — я еще не сталкивался с плохими и не взрывал ни одного, не потому что не пытался.

Если вам нравится звук однотактных триодов, вы знаете, что попробовать в первую очередь. Если вы хотите мощности и славы, вы переходите сразу к режиму Common Drain, но вам понадобится входной каскад, который обеспечивает адекватное усиление напряжения. У меня скоро будет один, но вы можете использовать предусилитель с большим усилением и низким выходным сопротивлением.

Ну вот и все. Надеюсь, вы построите что-то из того, что вы здесь увидели. Они достаточно просты и дешевы в контексте аудио высокого класса.