

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКНОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ
В ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМАХ *)****Е. Герольд**

ВВЕДЕНИЕ

Совсем недавно в электрических схемах использовались в качестве индуктивностей, емкостей и сопротивлений различные сочетания проводников, изоляторов и магнитных материалов; для усиления и иных нелинейных задач применяли электронные лампы. За последнее десятилетие явления в многочисленных твердых материалах были использованы для создания гираторов, переключающих и запоминающих устройств, усилителей, электронно-оптических преобразователей и термоэлектрических приборов. И сейчас мы можем увидеть тот день, когда химический синтез, улучшенные соединения, усовершенствованные методы их использования и открытие новых явлений в твердых материалах смогут сделать значительно больше для улучшения работы электронных схем, чем это могла сделать изобретательность инженера-специалиста по электронной аппаратуре. Если раньше качество разработки в основном зависело от качества электронных ламп, то в будущем оно будет зависеть главным образом от внедрения новых твердых материалов и открытых в них явлений. Кроме того, начавшееся вместе с развитием микроволновых ламп стремление объединить воедино с нелинейным прибором схему со всем ее монтажом и деталями в настоящее время все более и более распространяется и на другие диапазоны частот.

Чтобы дать читателю общее представление о явлениях в твердом теле, имеющих применение в электрических и электронных схемах, приведем их краткий перечень в виде таблицы (стр. 124).

Как видно из таблицы, число явлений в твердых телах, существенных для дальнейшего развития электронных схем, таково, что дать их полный обзор в одной статье невозможно. Поэтому здесь будут рассматриваться только явления, перечисленные в левой графе таблицы I. Мы рассмотрим явления сверхпроводимости, молекулярного усиления, нелинейной емкости, различного рода магнитные эффекты в полупроводниках и, наконец, явления, связанные с управляемой неоднородностью материалов. Все эти явления будут освещены так, чтобы обратить внимание специалистов на те из них, которые недостаточно широко используются.

*) E. W. Herold, Proceedings of the Symposium on the Role of the Solid State Phenomena in the Electrical Circuits, стр. 3—30, New York, April, 1957. Перевод Н. М. Колпакова.

Таблица

Чисто электрические явления	Явления преобразования энергии
<p>А. Процессы проводимости</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Нормальные металлы 2. Сверхпроводники 3. Полупроводники <ol style="list-style-type: none"> а) Термисторы б) Приборы с переходами в) Гираторы с эффектом Холла 4. Фотопроводники <p>Б. Диэлектрические явления</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Нормальные диэлектрики 2. Ферроэлектрики <ol style="list-style-type: none"> а) Электреты б) Модуляторы в) Накопительные приборы <p>В. Магнитные свойства</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Обычные магнитные металлы 2. Ферриты <ol style="list-style-type: none"> а) Накопительные приборы б) Гираторы 3. Другие спиновые резонансы, лазеры (молекулярные усилители) 	<p>А. Механической в электрическую</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Пьезоэлектричество 2. Электрострикция 3. Магнитострикция 4. Эффекты натяжения <p>Б. Тепловой в электрическую</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Омический нагрев 2. Термоэлектрический эффект <ol style="list-style-type: none"> а) Получение электричества б) Перенос тепла и охлаждение <p>В. Лучевой в электрическую</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Фотоэффект 2. Электролюминесценция 3. Рекомбинационные процессы 4. Бомбардировка частицами <ol style="list-style-type: none"> а) рентгеновскими лучами б) катодolumинесценция.

ПРОВОДИМОСТЬ В МЕТАЛЛАХ

Обычно в качестве твердых проводников в пассивных элементах схем служат медь, серебро, золото или алюминий. Их проводимости различаются очень незначительно (меньше чем на порядок величины), так что этим различием можно вполне пренебречь. Но поскольку в будущем область низких температур, вероятно, будет использоваться более интенсивно (на земле—за счет искусственного охлаждения, а в мировом пространстве—естественным путем), то, очевидно, нужно исследовать не только обычную (т. е. нормальную) проводимость, но и сверхпроводимость, чтобы выяснить возможность их применения в схемах, работающих в новых условиях.

Рассмотрим вначале сопротивление нормального (не сверхпроводящего) металла и какого-нибудь типичного сверхпроводника постоянному току. Так как во многих отношениях свойства меди, золота и серебра одинаковы, то вполне достаточно рассмотреть только один из этих металлов, например золото, относительно которого имеются наиболее полные сведения. Сверхпроводники также во многом схожи между собой, но так как белое олово наиболее подробно исследовалось, то мы возьмем его в качестве примера.

На рис. 1 показан график (с логарифмическим масштабом по обеим координатным осям), построенный по данным об удельных сопротивлениях, полученных различными исследователями^{1,2}.

При температурах, близких к комнатным, рассеяние носителей зарядов кристаллической решеткой обуславливает линейную зависимость удельного сопротивления от температуры. Говоря языком теории твердого тела, это область, где kT больше, чем энергия фонона, соответствующая максимальной частоте колебаний кристаллической решетки; эта

область должна лежать выше температуры Дебая*). Теория твердого тела утверждает, что до температуры Дебая удельное сопротивление будет иметь линейную зависимость от температуры, ниже этой температуры рассеяние на решетке начинает быстро уменьшаться, а удельное сопротивление будет изменяться пропорционально пятой степени температуры. По мере снижения температуры все более увеличивается длина свободного пробега отдельных носителей заряда, что, как мы увидим дальше, особенно важно при скин-эффекте на высоких частотах. В идеальной кристаллической решетке удельное сопротивление должно исчез-

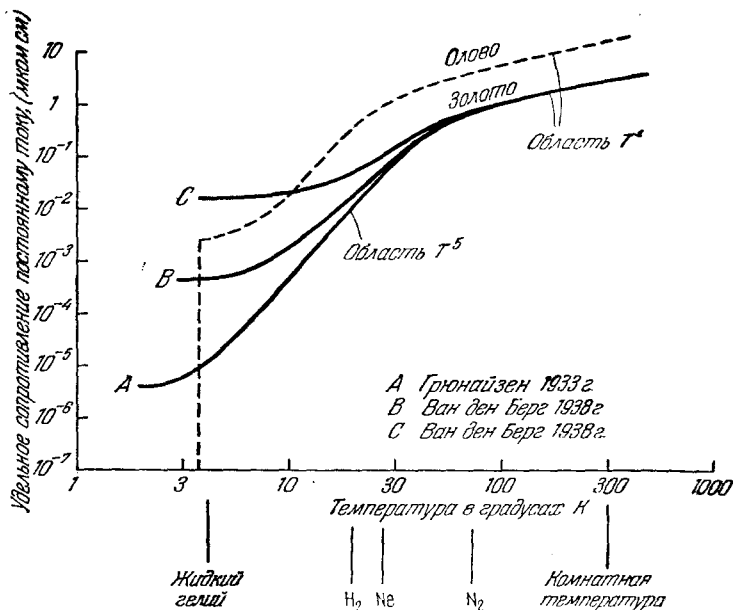


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления трех образцов золота и одного образца олова от температуры.

нуть при температуре, равной абсолютному нулю. Однако в действительности этого не происходит. Наоборот, у обычных металлов при низких температурах был найден остаток сопротивления, никогда не исчезающий полностью, в то время как у сверхпроводников всякое сопротивление исчезает уже при температурах, далеко не равных нулю.

Обычные металлы показывают остаточное сопротивление, которое приблизительно на два или три порядка величины ниже значения, соответствующего комнатной температуре, но у наиболее чистых и совершенных кристаллов оно может быть еще ниже. Образец золота (кривая А на рис. 1), исследованный Грюнайzenом в 1933 г., имел наименьшее остаточное сопротивление (на шесть порядков ниже обычного значения), но это исключение; два других образца более типичны для золота, а также меди и серебра.

Остаточное сопротивление обусловлено главным образом нарушениями и дислокациями кристаллической решетки, а также загрязнением металла.

Переход олова в сверхпроводящее состояние происходит при температуре, приблизительно равной 3,7° К, ниже этой температуры его

*) Температура Дебая—это та температура, умножив которую на постоянную Больцмана мы получим максимальную энергию фонона.

сопротивление постоянному току настолько мало, что не поддается измерению. Температура перехода и явления, сопровождающие ее, почти не зависят от загрязнений металла и свойств кристаллической решетки.

Обратимся теперь к явлениям, происходящим в пассивной цепи. В частности, рассмотрим, что происходит в цепи под действием переменного тока высокой частоты. Глубина проникновения тока в проводник при скин-эффекте определяется формулой³

$$\delta \approx 5000 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \text{ (с.м.)},$$

где ρ —удельное сопротивление, μ —магнитная проницаемость проводника, f —частота тока в Гц .

Применительно к поверхностному сопротивлению R_s , т. е. сопротивлению, рассчитанному на квадрат площади проводящей поверхности, это выражение можно записать в виде

$$R_s \approx 2 \cdot 10^{-4} \sqrt{\rho \mu f} \text{ (ом/см}^2\text{)}.$$

Обе эти формулы показывают, что активное сопротивление высокочастотному току при низкой температуре определяется как квадратный корень из значения сопротивления постоянному току, приведенного на рис. 1. Так, образец золота, у которого при понижении температуры сопротивление постоянному току уменьшается на шесть порядков величины, будет иметь уменьшение сопротивления для токов высокой частоты только на три порядка. Само собой разумеется, что никакие измерения не могут обнаружить этого.

При низких температурах, поскольку средняя длина свободного пробега носителей зарядов увеличивается и становится больше, чем глубина скин-слоя, носители начинают ударяться о поверхность, которая в этом случае ведет себя, как интенсивный источник рассеяния. Этим рассеянием и объясняется сильное увеличение сопротивления переменному току высокой частоты у всех нормальных металлов при низкой температуре (явление это носит название *аномального скин-эффекта*). Так, в образце золота A средний свободный пробег в массе, имеющий при комнатной температуре величину порядка миллионной доли сантиметра, при температуре $4,2^\circ \text{K}$ становится более одного сантиметра. В результате этого сопротивление высокочастотному току у нормальных металлов при низкой температуре совершенно *не зависит* от средней длины свободного пробега в массе (которая обуславливает величину сопротивления постоянному току), а *зависит* только от поверхностных условий.

На рис. 2 приводится график температурной зависимости поверхностного сопротивления золота переменному току при частоте 1200 МГц . Из него видно, что для золота в лучшем случае, может быть достигнуто трехкратное уменьшение сопротивления; это существенно отличается от расчетной величины. Более того, было установлено, что остаточное сопротивление высокочастотному току по существу не зависит от сопротивления постоянному току, обусловленного загрязнениями и дефектами кристаллической решетки, а зависит главным образом от гладкости и наличия дефектов на поверхности проводника*). Это поверхностное сопротивление пропорционально частоте в степени $2/3$ вместо степени $1/2$ при нормальном скин-эффекте. Отсюда мы можем сделать вывод, что применения обычных (нормальных) металлов при низких температурах

*) Необходимо иметь в виду, что здесь речь идет об активном сопротивлении высокочастотному току. (Прим. перев.)

в условиях применения токов высокой частоты не даст заметных преимуществ до тех пор, пока поверхностные условия или методы применения не будут улучшены настолько, чтобы можно было полностью использовать преимущества, создаваемые большими средними длинами свободного пробега носителей зарядов. Мы также можем заметить, что, вероятно, ни один новый сверхпроводящий металл нельзя будет получить только за счет снижения рассеяния на кристаллической решетке*). Эти выводы ставят перед физиками-исследователями твердого тела новые задачи, которые, как мы надеемся, будут ими в дальнейшем решены.

Сверхпроводники обладают поверхностным сопротивлением переменному току, резко отличающимся по поведению от поверхностного сопротивления нормального проводника для переменного тока, поэтому они

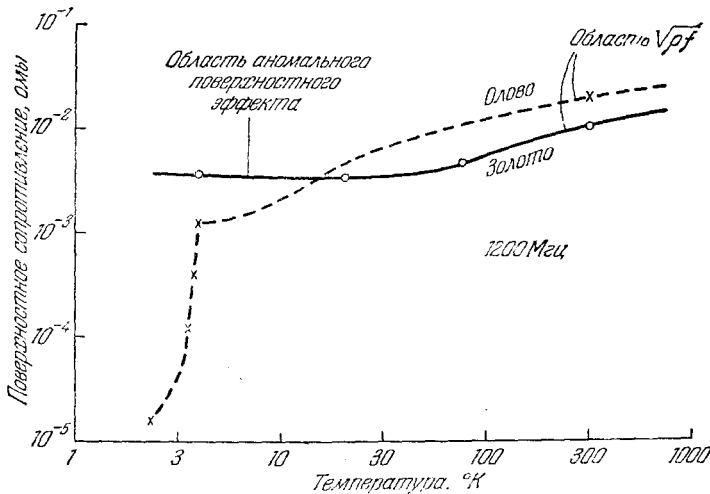


Рис. 2. Температурная зависимость поверхностного сопротивления высокочастотному току для золота и олова (при 1200 МГц).

создают большие возможности для инженера. Это особенно справедливо, если температуру можно было бы снизить значительно ниже температуры перехода. Так, например, из рис. 2 мы видим, что олово при температуре 2° К и частоте 1200 МГц имеет сопротивление, на три порядка меньше, чем самые лучшие проводники при комнатной температуре. Специалист может попытаться использовать это свойство непосредственно на практике, на наиболее важных участках своей работы. При этом его заинтересованность еще более увеличится, если охлаждение жидким гелием можно будет заменить термоэлектрическим, хотя последнее, вероятно, не легко осуществить.

На рис. 3 показаны кривые зависимости сопротивления переменному току от частоты для золота и олова. Ясно, что олово имеет больше преимуществ, даже в сантиметровом диапазоне волн.

В качестве возможной области применения описанного явления рассмотрим короткую симметричную или дипольную антенну. Полу-волновый диполь имеет сопротивление излучению около 70 см и поперечное сечение захвата порядка $\lambda^2/8$. Часто забывают, что очень короткий

*) В виде исключения будет случай применения высоких температур, т. е. температур, превышающих температуру Дебая обычных металлов. Здесь рассеяние будет очень сильным и существенное улучшение может быть достигнуто в результате разработки новых материалов, даже без увеличения концентрации электронов проводимости.

диполь (намного короче полуволны) имеет почти такое же большое поперечное сечение захвата и почти такую же диаграмму направленности, как и полуволновый⁵. К несчастью, короткий диполь имеет такое низкое сопротивление излучению (оно изменяется, как l^2/λ^2 , где l —длина диполя и λ —длина волны) и настолько высокое реактивное сопротивление, что их почти невозможно согласовать с нагрузкой без внесения значительных омических потерь. Однако в тех случаях, когда допустима высокая добротность, омических потерь можно избежать, используя сверхпроводник. Другими словами, антенна длиной в один дюйм (2,54 см), работающая на частоте около 100 Мгц, потенциально будет вполне способна принимать и передавать такое же узкополосное электромагнитное излучение, как, скажем, 5-футовый (152 см) полуволновый диполь.

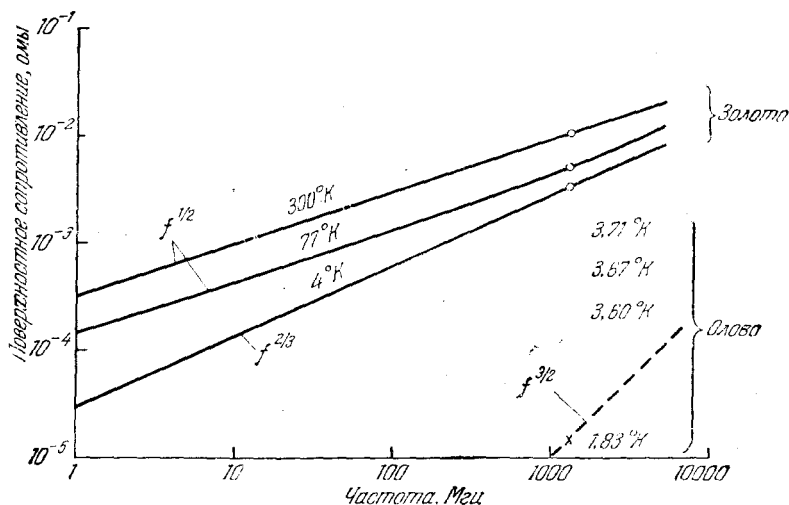


Рис. 3. Зависимость поверхностного сопротивления золота и олова для переменного тока высокой частоты при различных температурах.

Если же взять более сложную антенную систему, то (теоретически) можно даже создать очень сильно направленные антенны с очень небольшими габаритами. В недалеком будущем инженерам, по-видимому, придется решать проблему согласования сопротивления излучению, имеющего величину порядка нескольких тысячных ома, с помощью сверхпроводящего согласующего трансформатора. Безусловно, это время наступит раньше, если ученые, работающие в области физики твердого тела, смогут создать сверхпроводник с несколько более высокой температурой перехода.

Теперь рассмотрим использование явления сверхпроводимости в другом приборе, возможности которого сильно заинтересовали конструкторов вычислительных машин. Речь идет о приборе, названном «криотрон»⁶. В этом небольшом остроумном устройстве использовано свойство магнитного поля изменять температуру перехода материала из нормального состояния в сверхпроводящее.

На рис. 4,б приведена зависимость температуры перехода тантала от напряженности магнитного поля. Другой материал, ниобий, имеет намного бóльшую температуру перехода, следовательно, на него магнитное поле, изменяющее точку перехода тантала, не влияет. В любой точке, находящейся ниже температуры перехода (рис. 4,в), материалы будут сверхпроводящими, а выше — «нормальными». Мы видим, что при темпе-

ратуре жидкого гелия ($4,2^\circ \text{K}$) увеличение магнитного поля возвращает тантал в его нормальное, несверхпроводящее состояние, оставляя состояние ниобия без изменения. Криотрон, как это показано на рис. 4 *в*, состоит из небольшого отрезка танталовой проволоки с обмоткой из тонкой проволоки чистого ниобия. В качестве входа служит ток, протекающий через ниобиевую проволоку и не нуждающийся в напряжении, а следовательно, и в мощности. В качестве выхода служит падение напряжения на танталовой проволоке. Протекающий по ниобиевой обмотке ток создает магнитное поле; при увеличении тока магнитное поле может увеличиться настолько, что (при наличии критического магнитного поля)

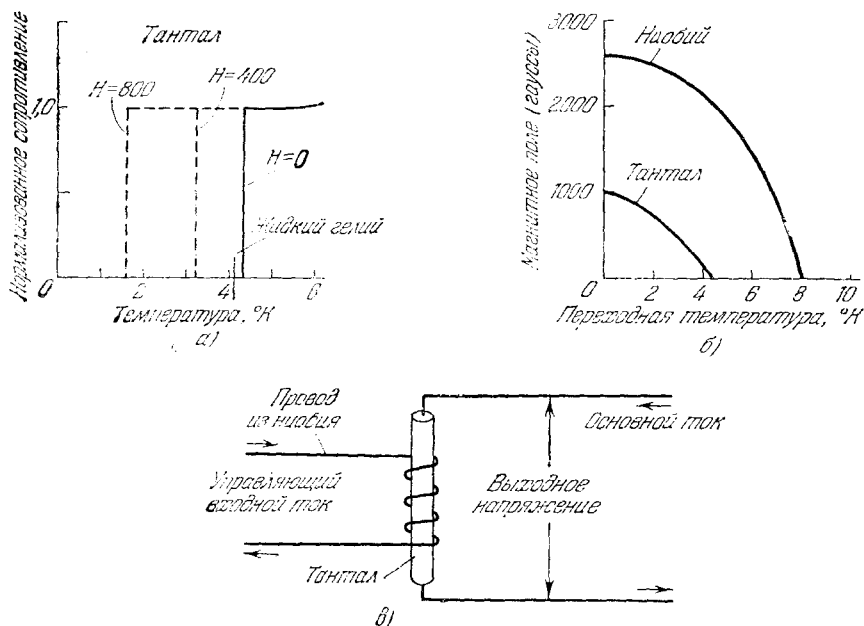


Рис. 4. Криотрон—сверхпроводящий усилитель, работающий при температуре $4,2^\circ \text{K}$.

тантал вернется к своему нормальному состоянию, т. е. его сопротивление увеличится и на нем будет происходить падение напряжения, которое будет являться выходным сигналом.

Криотрон является полным аналогом электронной лампы-триода, в чем легко убедиться, сравнив их характеристики. На рис. 5 изображена трехэлектродная лампа, где сеточное напряжение E_c управляет анодным током I_a , проходящим через нагрузочное сопротивление R . Если зашунтировать нагрузку R_n и при различных значениях E_c изменять анодное напряжение E_a , то мы получим семейство анодных характеристик, показанных на рисунке. Рассмотрим работу криотрона. Его управляющий ток I_c , проходя через ниобиевую обмотку, управляет напряжением E_a на танталовой проволоке (сердечнике) и нагрузочном сопротивлении R_n . Если нагрузочное сопротивление отключить и изменять основной ток I_a , то танталовая проволока или совсем не имеет сопротивления, чему соответствует отсутствие какого-либо выходного напряжения, или ее сопротивление начинает возрастать так, что E_a изменяется вместе с изменением I_c , как это показано, например, на рис. 5. Таким образом, характеристики криотрона те же, что и характеристики триода,

за исключением только того, что напряженне заменяется током, а ток заменяется напряжением *).

Одинаковое расположение кривых на рисунке чисто условное и не означает ни линейности, ни другого подобия характеристик.

Если на триод никакого управляющего напряжения не подается, то этому положению соответствует кривая, обозначенная на рис. 5 нулем. Эта кривая—результат воздействия только анодного напряжения, управляющего своим собственным током (обратите внимание на то, что кривая расположена слева). Для криотрона при отсутствии управляющего тока соответствующая кривая также отмечена нулем. Только теперь это результат воздействия основного тока, который собственным магнитным

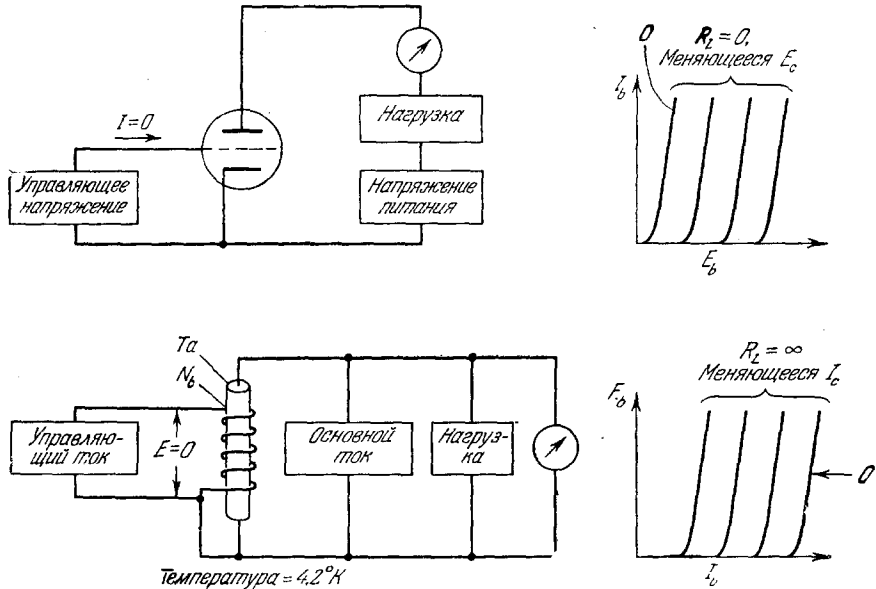


Рис. 5. Криотрон как аналог электронной лампы-триода.

полем в определенной точке разрушает сверхпроводящее состояние тантала, после чего начинает управлять напряжением на выходе. Однако кривая криотрона, обозначенная нулем, находится с правой стороны семейства кривых. Отметим еще одну особенность: все кривые триода при достаточно больших значениях тока, в конце концов, сливаются в одну предельную кривую (на рисунке не показана), зависящую от эмиссионной способности катода, в то время как кривые криотрона при высоких напряжениях сливаются в одну кривую, обусловленную законом Ома для обычного тантала при соответствующей температуре. На практике из-за нагревания проводника основным током криотрон может слегка изменить собственную температуру, вследствие чего характер кривых также изменится. Более подробно о применении криотрона в вычислительной технике см.⁶.

На этом мы закончим обзор вопросов, связанных с проводимостью металлов, и перейдем к другим явлениям в твердых телах, которые также могут быть использованы в электронных схемах.

*) Аналогия также сохраняется и на высоких частотах. При этом схема триода имеет три емкостных сопротивления на входной и выходной цепях и в цепи связи, а схема криотрона—три индуктивных сопротивления.

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ УСИЛИТЕЛИ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ (МАЗЕРЫ)

Рассмотрим теперь другую многообещающую область, открытую несколько лет назад после создания молекулярного усилителя. Резкий переход от одной темы к другой сам по себе говорит о ширине области явлений в твердых телах и должен подготовить нас к подобным переходам, которые то и дело будут встречаться в нашей статье.

Для тех, кто недостаточно знаком с новым термином, сообщаем, что слово «мазер» (maser)—это сокращение, расшифровываемое как «молекулярное усиление при помощи индуцированного излучения» (molecular amplification by stimulated emission radiation). Мазер относится к классу микроволновых усилителей и генераторов, которые в отличие от усилителей на лампах и транзисторах не требуют для себя питания. Для специалистов, работающих в области электроники, это может показаться не совсем понятным, так что мы остановимся на этом вопросе подробнее.

Нам всем знакомо излучение света атомами и молекулами газа, внутренняя энергия которых увеличилась под воздействием электрического разряда (газовый разряд). Некогда считали, что излучение света происходит в результате рекомбинации свободных электронов и положительных ионов, но эта гипотеза была отвергнута, как только посредством измерений было доказано полное несоответствие между энергией ионизации и (намного меньшей) энергией излученных квантов света. Впоследствии было установлено, что причиной излучения являются переходы между внутренними энергетическими состояниями, и было показано, как за счет возбуждения молекул при последующем возвращении молекулы газа в основное состояние получается широкий спектр электромагнитного излучения. Возбужденные энергетические уровни имеют энергию в несколько эв, а излучение света происходит спонтанно и мгновенно. Говоря языком радионженера, это означает, что система обладает очень малой добротностью, т. е. имеет широкую полосу излучаемых частот. Для большей наглядности можно сказать, что излучение напоминает тепловой шум в радиосхеме, т. е. оно некогерентно и сравнительно нечувствительно к внешнему возбуждению. Переходы между уровнями с большой разностью энергий дают излучение на частотах, выходящих за спектр радиочастот.

Несколько лет назад Вебер указал, что среди большого числа различных энергетических состояний молекулы есть такие состояния, у которых разности энергий очень незначительны и переходы между которыми сопровождаются излучением радиочастот, а не видимых лучей. Более того, оказалось, что среди молекул есть такие, что могут сохранять свои возбужденные энергетические состояния достаточно долго, так что возбужденные молекулы становятся чувствительными к внешнему возбуждению. Это свойство объясняется большим «временем релаксации».

Таким образом, если систему молекул перевести в более высокое энергетическое состояние, то сигнал соответствующей частоты, облучающий эту систему извне, может вызвать ее излучение, пропорциональное по интенсивности мощности сигнала и синхронное ему по фазе, так то в результате можно получить усиление приходящего сигнала. При этом основная проблема заключается в том, чтобы найти соответствующее средство для возбуждения молекул, а не нужное энергетическое состояние, потому что обычно имеется очень большое число возможных состояний возбуждения. Гордон, Цейгер и Таунз⁸ сообщили, что такого рода избирательное возбуждение может быть осуществлено с парами аммония, которые поэтому можно использовать для усиления. Вторая задача,

возникающая с самого начала, заключается в увеличении выходной мощности. Полная энергия, излучаемая при переходе одной молекулы с одного энергетического уровня на другой на радиочастотах, составляет всего лишь 10^{-5} эв (10^{-24} вт · сек) и даже меньше. Следовательно, для того чтобы получить достаточную выходную мощность, необходима огромная концентрация возбужденных молекул; но этого можно добиться только при использовании твердых материалов. Но здесь вновь встает первая проблема—проблема способа возбуждения. К счастью, для ее решения имеется несколько возможностей. (По этому вопросу опубликована подробная обзорная статья ⁹, так что здесь мы ограничимся беглым рассмотрением существующих способов возбуждения твердого тела.)

На рис. 6 изображена обычная диаграмма энергетических уровней, показывающая возможные внутренние энергетические состояния, а также даны значения той небольшой энергии, которая выделяется при переходах

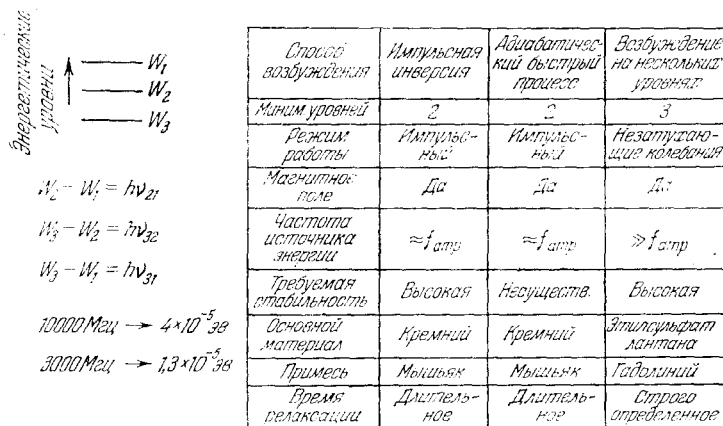


Рис. 6. Мазеры с твердой средой; таблица способов возбуждения.

на микроволновых частотах. Предположим, что мы имеем материал с тремя указанными энергетическими уровнями. В состоянии термодинамического равновесия количество молекул на уровне W_3 будет больше, чем на W_2 , в котором в свою очередь будет больше молекул, чем на уровне W_1 . Таким образом, облучающая систему радиоволна с частотой ω_{32} может быть поглощена во время перехода молекул от уровня W_3 к уровню W_2 . При сильных возбуждениях населенность уровня W_2 изменяется до тех пор, пока не сравняется со значением населенности уровня W_3 (в этой точке количество поглощенной энергии всегда одинаково и зависит только от начального неравенства). Если бы мы смогли найти способ искусственного увеличения населенности состояния W_2 , чтобы она с самого начала превысила населенность энергетического состояния W_3 , то в этом случае у нас имела бы большая возможность получения энергии, чем ее отдачи.

В том случае, когда у системы молекул имеются три и больше энергетических состояния, для получения энергии излучения достаточно увеличить населенность любого более высшего энергетического состояния, а это в свою очередь создает больше возможностей при выборе средств возбуждения.

Пригодный для этой цели твердый материал представляет собой кристалл, содержащий другие кристаллы с пучными однородно рассеянными атомами и молекулами (резонансные свойства которых мы хотим использовать). Было установлено, что наиболее подходящим для этой

цели является парамагнитный атом. При таком сочетании основных кристаллов с примесными отдельными вырожденные энергетические уровни под воздействием внешнего магнитного поля расщепляются на ряд близко расположенных уровней. Поскольку расщепление создается внешним магнитным полем, система является «настраиваемой», т. е. ее можно настроить на нужную частоту. Так, в системе с двумя энергетическими уровнями был использован кремний с примесью мышьяка¹⁰; в системе с тремя уровнями использован гадолиний в кристаллах этилсульфата лантана¹¹. Во избежание взаимодействия с тепловыми колебаниями кристаллической решетки оба названных усилителя должны работать при низкой температуре. Вся аппаратура, необходимая для усилителя, очень проста и состоит из микроволнового резонатора, нагруженного кусочком основного материала с примесью; резонатор помещен в криостат между полюсами магнита.

На рис. 6 показаны три наиболее известных способа возбуждения. Во всех трех способах входная мощность подается на радиочастоте. При импульсной инверсии радиочастотный сигнал импульсируется и молекулы, например уровня W_3 (вследствие резонансного поглощения), возбуждаются до уровня W_2 , т. е. их населенности взаимно меняются. Когда в промежутках между импульсами подача энергии сигнала прекращается, система может дать усиление или генерирование на той же частоте. Даже при незначительном изменении напряженности магнитного поля усиление, или генерирование, уже происходит на другой частоте. Поэтому в целях обеспечения надежной работы магнитное поле и частота возбуждения должны быть достаточно стабильными. Существенным является также большое время релаксации.

В другой импульсной системе использован так называемый быстрый адиабатический процесс. В этой системе частота энергии питания или магнитное поле колеблется с относительно большой скоростью по сравнению с временем релаксации около определенной заданной резонансной точки. Сразу же после каждого отклонения населенности уровней становятся взаимно перевернутыми, и система «готова» к усилению. Этот метод аналогичен методу импульсной инверсии, но в отличие от него не нуждается в большой стабильности ни по напряженности магнитного поля, ни по частоте радиосигнала.

В третьей системе, описанной в статье Блембергена¹², возможна непрерывная работа. Кроме того, система имеет еще и ряд других преимуществ. Однако она требует тщательного подбора материала, так как в этом материале между различными уровнями должны быть одновременно два времени релаксации—малое и большое. Частоту энергии питания надо выбрать так, чтобы она соответствовала частоте W_{31} перехода. Только после этого населенность W_1 становится равной населенности W_2 , а промежуточное энергетическое состояние W_2 имеет соответственно меньшую или большую населенность относительно соседних уровней W_1 и W_3 . Если населенность уровня W_2 меньше, усиление происходит между W_{21} (верхний переход). Если его населенность больше, усиление возникает между переходом W_{32} (нижний переход). Для того чтобы получить наибольшую разность населенностей, как раз и нужно иметь на W_1-W_2 и W_2-W_3 переходах одно малое, а другое большое время релаксации. Все эти различия—различия во времени релаксации, частотные различия (при том или ином использовании усилителя)—и заставляют тщательно подбирать материал.

Фирмой «Бэлл Телефон Лабора́трис» был собран генератор для работы на частоте около 9000 $M\mu$, использующий частоту энергии питания 17 500 $M\mu$ и магнитное поле 3000 $гс$; в качестве материала был

использован гадолиний в кристаллах этилсульфата лантана. В него было введено немного церия, а также обеспечена соответствующая ориентация магнитного поля с целью улучшения взаимодействия во время перехода и уменьшения времени релаксации.

Ширина полосы частот молекулярных усилителей и генераторов с твердым телом простирается приблизительно от 1 до 10 *Мгц*, при верхнем пределе—около 100 *Мгц*. Рабочая частота, как правило, находится выше 1000 *Мгц*. Шум-фактор должен быть почти равен нулю, так как низкая температура и отсутствие теплового движения заряженных частиц устраняют источники внутренних шумов.

Для таких усилителей и генераторов главным образом нужно магнитное поле и источник микроволновой энергии, а при возбуждении методом многих уровней нужен многорезонансный микроволновый объемный контур.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ЭФФЕКТ ХОЛЛА

При помещении проводника с током в поперечное магнитное поле в нем возникает эффект Холла. Эффект состоит в том, что под действием магнитного поля в проводнике возникает сила (определяемая правилом Ампера), которая действует на ток таким образом, что траектории носителей тока отклоняются в направлении, перпендикулярном к направлению тока и магнитных силовых линий, и если носители зарядов положительны, то на поперечных сторонах проводника появляется поперечная ЭДС одной полярности; отрицательные заряды дают ЭДС другой полярности. Эта ЭДС, известная как напряжение Холла, используется для определения знака и подвижности носителей зарядов и является важным средством исследования полупроводников. Эффект Холла нашел также практическое применение в приборах, используемых в электронных схемах; три таких прибора будут нами рассмотрены ниже.

Для тех, кто знаком с классической теорией цепей, гиратор покажется загадочным и удивительным элементом цепи. Так как ферритовый гиратор в основном используется только в микроволновом диапазоне, мы часто пренебрегаем им как элементом обычных схем, хотя его можно использовать везде, вплоть до электрической цепи дверного звонка. (Возможно, это уж слишком практический взгляд на вещи.) Благодаря использованию эффекта Холла удалось создать чрезвычайно простой необратимый четырехполюсник, который может работать в широком диапазоне частот, от нуля до очень высоких. На рис. 7 изображена классическая схема для демонстрации эффекта Холла и тут же показано, каким образом эта схема была использована Мезоном и его сотрудниками для создания гиратора¹³.

Когда ток I проходит через полупроводник n -типа, помещенный в поперечное магнитное поле (см. рис. 7, *a*), то на его боковых сторонах появляется ЭДС, определяемая формулой

$$U = \frac{RH}{W},$$

где R —постоянная Холла, пропорциональная подвижности носителей зарядов, деленной на проводимость; W —толщина образца. Направление ЭДС Холла показано на рисунке.

Если теперь взять квадратный полупроводник, с каждой стороны которого симметрично установлены контакты (как это показано на рис. 7, *b*), то можно заметить, что в магнитном поле электрод A как бы имеет омический контакт с электродом B , а электрод C —с D . Батарей, включенная,

как показано на рисунке, т. е. с положительной клеммой, присоединенной к электроду *A*, создает положительное выходное напряжение на электроде *B*, присоединенном к сопротивлению нагрузки R_L . Таким образом, ток питания отклоняется по часовой стрелке, и на верхнем конце нагрузочного сопротивления мы будем иметь положительное напряжение. Поменяем местами батарею и нагрузочное сопротивление так, как это показано на рис. 7, *в*. Теперь ток питания, направляясь к электроду *B*, отклоняется по часовой стрелке, и положительное напряжение будет уже на нижнем конце нагрузочного сопротивления. В этом и состоит принцип работы гиратора. Из схемы видно, что выходной сигнал на

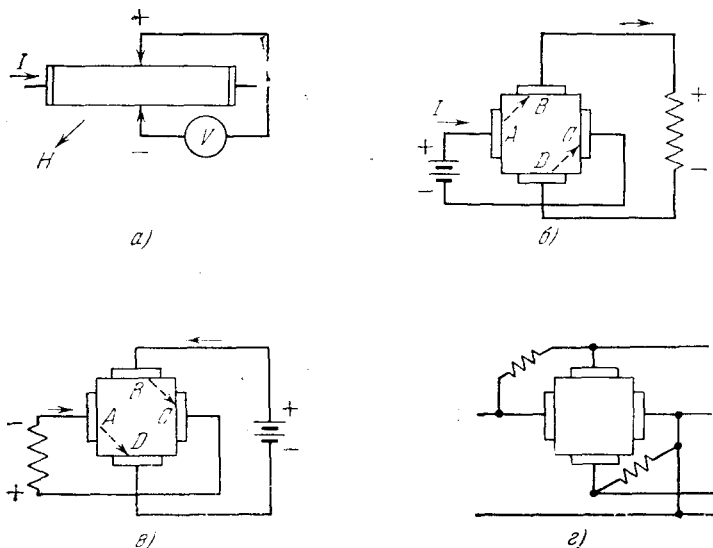


Рис. 7. Гиратор Холла:
 а) эффект Холла; б) гиратор, прямое направление; в) гиратор, обратное направление; г) изолятор.

четырёхполюснике, приложенный в одном направлении, имеет сдвиг фазы на 180° по отношению к выходному сигналу, приложенному в другом направлении.

Рассмотрим уравнения цепи. Для резистивного четырёхполюсника можно написать:

$$U_1 = I_1 R_{11} + I_2 R_{12},$$

$$U = I_1 R_{21} + I_2 R_{22}.$$

Обычно все пассивные обратимые четырёхполюсники имеют $R_{12} = R_{21}$. Определитель матрицы сопротивлений

$$\Delta = R_{11} R_{22} - R_{12}^2$$

равен нулю, если

$$R_{11} = R_{22} = R_{12} = R_{21}.$$

Поэтому в системе передачи вносимые минимальные потери также будут равны нулю.

Для гиратора Холла $R_{12} = -R_{21}$. В этом случае определитель равен

$$\Delta = R_{11} R_{22} + R_{12}^2$$

и не обращается в нуль. Если в формуле вносимых потерь (использующей мнимый омический контакт) считать

$$R_{11} = R_{22} = R_{12},$$

то минимальные потери будут равны 7,7 дб. Это основной недостаток гиратора Холла по сравнению с ферритовыми гираторами. Последние по своей природе являются реактивными и почти не вносят потерь передачи.

Для превращения гиратора в изолятор нужно только шунтировать взаимные омические элементы, как, например, показано на рис. 7 г. В уравнении цепи это равносильно добавлению положительных сопротивлений к значениям R_{12} и R_{21} , вследствие чего один из диагональных членов уменьшается до нуля. Теперь передача может быть только в одном направлении, и минимальные потери теоретически снижаются до 6 дб.

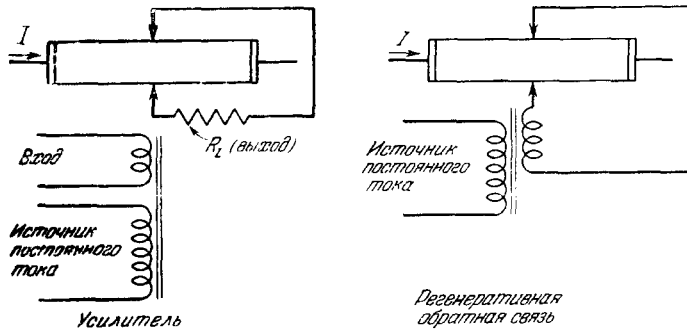


Рис. 8. Усиление посредством использования эффекта Холла.

Практически наилучшие результаты получаются с такими полупроводниками, которые имеют рекордно высокую подвижность электронов; к таким полупроводникам относится, например, антимонид индия. При их использовании можно добиться такого положения, что потери в прямом направлении будут равными почти 10 дб, в то время как в обратном— 70 дб. Приборы, которые будут использованы на практике, можно сделать очень маленькими, хотя нужно довольно сильное магнитное поле (чем сильнее, тем лучше). В тех случаях, когда требуется изолятор в широком диапазоне частот, а электронная лампа, вследствие ее усиливающего действия, непригодна для этой цели, можно примириться с потерями, вносимыми гиратором Холла. При этом вполне можно получить значения потерь, более близкие к теоретическим, чем обычно.

Кроме вышеперечисленных случаев, эффект Холла можно также использовать и для усиления¹⁵ (см. рис. 8). Было установлено, что за счет управления напряженностью магнитного поля при включении нагрузки на клеммы, с которых снимается ЭДС Холла, можно получить усиление по мощности. В схеме с обратной связью, также показанной на рис. 8, можно получить отрицательное сопротивление.

Другим прибором, использующим эффект Холла, является новый выпрямитель, впервые описанный Велькером¹⁶. В этом приборе в отличие от всех других детекторов в процессе выпрямления тока участвует вся масса полупроводника, а не отдельные контактные точки или барьеры. На рис. 9 изображена пластинка почти чистого полупроводника, помещенного в магнитное поле. Одна сторона пластинки матовая (после пескоструйной обработки), а другая—гладкая. Матовая сторона обладает по-

верхностью с высокой скоростью рекомбинации, а в состоянии равновесия, кроме того, имеет высокие скорости генерации носителей заряда. В отличие от этого гладкая сторона имеет небольшую скорость рекомбинации. Когда к прибору прикладывается напряжение, положительное на левую клемму и отрицательное на правую (см. чертеж на рис. 9), тогда дырки и электроны, генерируемые на матовой верхней поверхности полупроводника, двигаются в массе полупроводника вниз к гладкой поверхности, имеющей малую скорость рекомбинации. Вследствие невысокой скорости рекомбинации в полупроводнике происходит высокая концентрация носителей зарядов, поэтому через него будут протекать большие токи. При изменении полярности напряжения, приложенного на клеммы полупроводника, носители направляются вверх, к матовой поверхности,

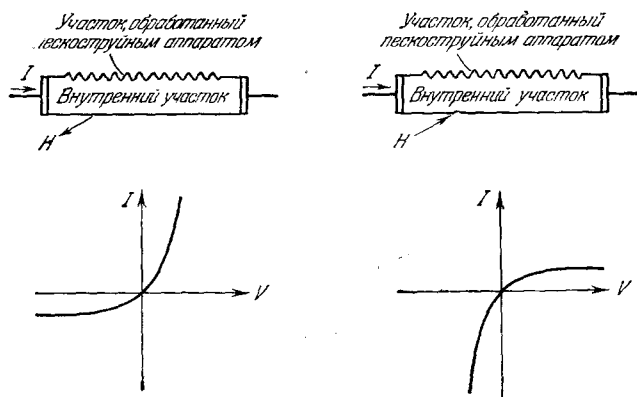


Рис. 9. Магнитный выпрямитель с использованием всей массы полупроводника.

обладающей высокой скоростью рекомбинации. Так как в полупроводнике каких-либо других поверхностей генерации носителей нет, то их концентрация будет низкой и через полупроводник будут протекать очень слабые токи. При изменении полярности магнитного поля полярность выпрямителя также меняется, как это показано на рис. 9.

Такие выпрямители представляют собой очень интересные и оригинальные приборы, которые, безусловно, найдут в дальнейшем широкое применение. Так же как в других приборах, построенных на эффекте Холла, здесь можно использовать полупроводники с очень высокой подвижностью носителей. К таким полупроводникам относятся полупроводники, полученные в результате соединений III—V группы таблицы Менделеева, особенно антимионид и арсенид индия.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ КОНДЕНСАТОР

В результате ряда исследований возможностей использования емкости обедненного слоя точечного или плоскостного полупроводникового диода было установлено, что когда на такой диод подается напряжение смещения в обратном (запирающем) направлении, то образуется свободный от носителей слой, толщина которого зависит от приложенного напряжения. Этот слой является диэлектриком с относительно малыми потерями, поскольку новые заряды, возникающие здесь, быстро исчезают и не вызывают каких-либо эффектов переменного тока до очень высоких частот. Электроно-дырочный переход можно рассматривать как конденсатор, емкость которого зависит от напряжения постоянного тока,

приложенного к нему. Эта зависимость показана на рис. 10, а. Получаемое при этом отношение изменения емкости к напряжению, например, в германиевом $p-n$ -переходе достигает при изменении напряжения на 15 в отношения: 3 : 1.

К сожалению, имеющиеся диоды не предназначены для работы в качестве конденсаторов, и их потери довольно велики по сравнению с потерями в обычных конденсаторах. Между тем нет никаких принципиальных затруднений для того, чтобы сконструировать прибор с малым эквивалентным сопротивлением и тем самым получить конденсатор с высокой добротностью. Такой конденсатор был создан Джаколето и О'Кунелем¹⁷.

Разнообразны методы использования этого простого и недорогого прибора. Так, например, если его использовать в частотном модуляторе,

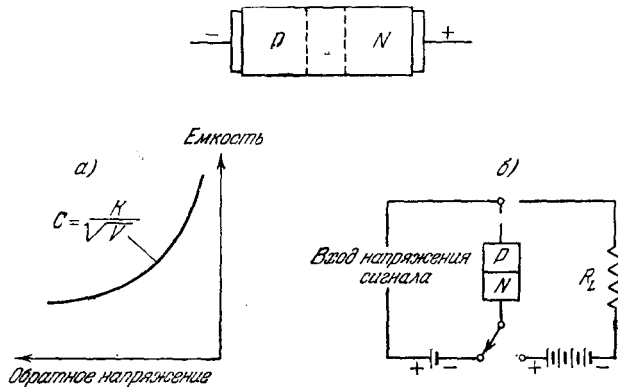


Рис. 10. $p-n$ -переход как переменный конденсатор.

то изменение емкости достигает почти 10% на один вольт. Следовательно, при работе в полосе 100 Мгц нужно только приложить модулирующий сигнал напряжением 14 мв (эфф.), чтобы получить модуляцию с шириной полосы в 200 Кгц. Такое напряжение легко получить прямо от микрофона без каких-либо каскадов предварительного усиления. Поскольку емкость коллектора транзистора может быть использована для модуляции собственной частоты, то отдельный модулятор на диоде становится вообще ненужным. На практике такая схема была использована в генераторе в цветном телевидении, который автоматически синхронизировался сигналом синхроимпульса. При этом вся схема имела только один транзистор¹⁸.

Используя в качестве основы нелинейный конденсатор, можно сконструировать различные коммутирующие устройства, делители, смесители и генераторы гармоник. При этом очень важно то, что подобный конденсатор, по существу, не зависит от температуры и не имеет петли гистерезиса даже на частотах, доходящих до нескольких тысяч мегагерц. Следовательно, он во многих отношениях более выгодно отличается от приборов с ферроэлектрическими диэлектриками.

Можно создать усилители, используя ферромагнитные и ферроэлектрические материалы, но усилители также можно сконструировать, используя в качестве нелинейного элемента полупроводниковый конденсатор. Методы использования будут те же самые, что и для ферромагнитных усилителей, т. е. основной сигнал (питающий) должен иметь более высокую частоту, чем усиливаемый. Работу нелинейного конденсатора легче уяснить в отсутствие петли гистерезиса. Так, если предположить, что

входной сигнал модулирует высокую частоту основного сигнала, а выпрямитель используется для демодуляции сигнала на выходе, то можно получить точную картину поведения такого нелинейного реактивного сопротивления¹⁹. Так как емкость обедненного слоя зависит от основных носителей, то изменения емкости от напряжения исключительно быстры, и в принципе подобный конденсатор можно использовать для усиления сигналов даже микроволнового диапазона. Если же в переменном полупроводниковом конденсаторе нет каких-либо потерь, тогда и шумы в нем будут сравнительно низки.

Полупроводниковый конденсатор с нелинейной емкостью можно использовать для получения усиления и по другому принципу (см. рис. 10, б). Пусть переключатель, показанный на рис. 10, б, срабатывает с очень большой частотой. При этом в положении «вход» конденсатор имеет большую емкость, так как напряжение обратного смещения мало. Затем входным сигналом конденсатор заряжается до величины, определяемой временем зарядки и величиной включенного последовательно с ним сопротивления. После этого переключатель перебрасывается на клемму с более высоким напряжением, и величина емкости внезапно падает. Поскольку заряд, созданный сигналом, остается постоянным, то напряжение, соответствующее ему, должно возрасти обратно пропорционально значению емкости. Таким образом, на нагрузке получается дополнительная выходная мощность, и вся система дает усиление мощности. Коэффициент усиления невелик, так как изменение емкости обычно меньше порядка величины емкости.

За счет использования концентрации неосновных носителей можно получить и большие коэффициенты усиления, но в результате будет одновременное снижение частотной характеристики. Для такой работы усилителя входная батарея включается в пропускном направлении, в силу чего течет очень сильный ток неосновных носителей. До того как наступит положение равновесия, переключатель перебрасывается в положение «выход», и неосновные носители зарядов опять исчезают. Эквивалентное изменение емкости в этом случае равно нескольким порядкам величины, поэтому и усиление по мощности получается соответственно выше. Но так как теперь используется поток неосновных носителей, то верхний частотный предел определяется временем пролета носителей (как в транзисторах). Практически, конечно, трудно осуществить быстрое переключение механическим путем, поэтому для переключения используют высокочастотный генератор и блокирующий диод, так что вся схема, по существу, будет такой же, как и описанный выше резонансный усилитель.

УПРАВЛЯЕМЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Развитие техники обязано своими успехами в основном компромиссам, на которые приходится идти при решении проблем, не дожидаясь идеального варианта. Подобно этому ученый-теоретик выдвигает гипотезу, которая позволяет найти искомое решение, даже если эта гипотеза и не совсем точно подходит для решения данной проблемы в целом. Когда инженер-конструктор трансформаторов использует такой неидеальный проводник, как медь, и такой неидеальный материал сердечника трансформатора, как кремнистая сталь, то добивается наилучшего решения, которое будет компромиссом между идеальным и практически возможным трансформаторами. Такая же картина наблюдается и в других электрических цепях, собираемых из «наилучших» проводников с изоляцией из «наилучших» диэлектриков, хотя ни один из этих «наилучших» не является действительно идеальным материалом.

Элементы периодической системы Менделеева и получаемые из них сплавы, соединения, смеси никогда не являлись и не являются идеальными материалами. Каждый год вносятся новые улучшения и усовершенствования, но достигаемый результат всегда остается компромиссным.

В настоящее время технология твердого тела достигла такого состояния, когда метод компромисса может быть использован гораздо шире, чем просто выбор «лучшего» материала путем сопоставления его с другим материалом, как это было раньше. Поясним приведенную мысль на примере с нагруженной стальной балкой, изображенной на рис. 11.

Зная расстояние между опорами и вес, которым нагружена балка, можно составить таблицу структурных характеристик стали и найти сплав и размеры двутавровой балки, которые удовлетворят нашим требованиям. Но достаточно ли этого? Нет. Чтобы уравнять возникающие напряжения, металлург может предложить более лучший или более дешевый сплав, а инженер-конструктор может предложить переменное поперечное сечение балки. Практически оба эти решения являются компромиссом, к которому приходится прибегнуть вследствие ограниченности выбора материала.

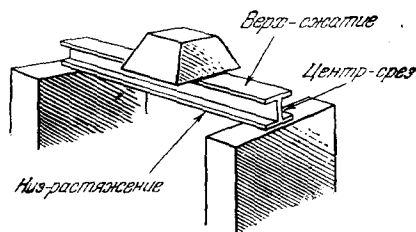


Рис. 11. Балка, несущая груз. Напряжение меняется по длине балки. Наилучшие результаты достигаются непрерывным изменением свойств материала по длине балки.

Рассмотрим задачу более подробно. Верх балки испытывает напряжение сжатия, низ — напряжение растяжения и середина шейки балки — напряжение сдвига. Каждое из этих напряжений изменяется вдоль и поперек балки так, что каждый участок балки предъявляет требова-

ния к материалу, до некоторой степени отличающиеся от требований, предъявляемых к другим участкам. Нужно ли для всей балки по всей длине и сверху донизу использовать один и тот же сплав? Ведь путем тщательного выбора неоднородного материала можно получить балку такой же прочности, но из меньшего количества затрачиваемого материала или из более дешевого. Приведенный пример, конечно, не является практически приемлемым для современной экономики и техники стройматериалов, но он показывает суть дела*).

К счастью, в электронных приборах с твердым телом для решения подобных проблем можно использовать последние достижения науки и техники. Ведь для этого требуется сравнительно небольшое количество материала, а следовательно, мы можем позволить себе такую роскошь, как использование редких химических элементов, таких, как, например, селен, германий, галлий и др. В пьезоэлектрических и полупроводниковых материалах мы даже можем использовать и используем самые чистые, идеальные монокристаллы. Хорошее начало (в области транзисторов, по крайней мере) было положено по улучшению качества полупроводни-

*) Более практическим примером будет резец токарного станка, режущая кромка которого подвергается иной термообработке, чем остальная часть резца. Другим примером является цементированная износостойчивая поверхность шарикоподшипника или другой механической детали, внутренняя часть которой имеет необходимую твердость или другие необходимые свойства. Последнее особенно интересно, потому что это можно сделать за счет диффузии в твердом теле, примененной так же, как для получения неоднородного участка базы в дрейфовом транзисторе, о чем будет рассказано ниже.

ковых приборов путем использования управляемой неоднородности. Это в достаточной степени знаменательно, чтобы остановиться подробнее.

Обычный транзистор имеет два $p-n$ -перехода. Здесь материал с примесью p -типа сочетается с материалом с примесью n -типа. Это является одним из случаев неоднородности, так как фактически здесь внутри материала существует резкий переход между двумя однородными участками. Хотя такой переход более сложен, но он ничем не отличается от тех переходов, которые часто встречаются в электрических цепях, когда, например, медный провод резко переходит к своему пластическому изоляционному покрытию или припаивается к концу сопротивления и т. д. В ходе дальнейшего обсуждения мы увидим, что такие переходы можно улучшить.

Без сомнения, транзистор является чудесным прибором, но у него, как и у любого прибора, есть недостатки. Главным среди них является низкая частотная характеристика, определяемая главным образом подвижностью носителей заряда—электронов и дырок. Хотя хотелось бы иметь полупроводниковый прибор, хорошо работающий как при комнатной, так и при более высоких температурах и практически обладающий бесконечно большой подвижностью носителей, однако элементы периодической системы и соединения, полученные из них, не позволяют нам это сделать. Так, например, полупроводниковые приборы, изготовленные из материалов, которые имеют более высокие порядки величины подвижности, чем германий, не будут работать даже при комнатной температуре.

Однако за последние два года за счет применения непрерывной и управляемой неоднородности полупроводникового материала в транзисторах, работающих при комнатной температуре, добились улучшения частотной характеристики почти на один порядок величины. В первой статье, опубликованной Кремером, эта радикально улучшенная структура была названа дрейфовым транзистором²¹. Кроме того, по способу получения этот транзистор был также назван другими терминами: «транзистор с диффузионной базой» и «диффузионно выращенный транзистор». Мы будем называть его дрейфовым транзистором²².

В дрейфовом транзисторе улучшение частотной характеристики достигается за счет специально подобранного неоднородного распределения примесей в области базы, которое создает внутреннее электрическое поле. Это поле значительно ускоряет движение носителей от эмиттера к коллектору и намного улучшает частотную характеристику транзистора. На рис. 12 схематически изображены два прибора: обычный транзистор с однородной базой и дрейфовый транзистор с базой с неоднородным примесным распределением.

Так как доноры в базовой области действуют в качестве постоянных положительных зарядов вследствие их накопления вблизи эмиттера и уменьшения около коллектора, они создают «встроенное» электрическое поле, которое передвигает дырки от эмиттера к коллектору во много раз быстрее, чем они двигаются под действием обычной диффузии.

Теоретически наилучшее примесное распределение—это распределение по экспоненциальной функции расстояния, которое ведет к улучшению характеристики на один порядок величины. Практически же диффузия примесей в твердой среде приводит к распределению по функции ошибок, которое хотя и близко к оптимальному, но дает скорее пятикратное, чем десятикратное улучшение²³.

Мы должны заметить, что раньше инженер, обладая обычным транзистором с однородной базой, был относительно ограничен в своих возможностях. Так, он не мог создать, как в электронной лампе, внутреннее

электрическое поле, благодаря которому он мог бы ускорить движение носителей заряда за счет увеличения анодного напряжения. Фиксированные донорные примесные центры, которые, собственно, и позволили сконструировать транзистор, удерживали действие напряжения только в обедненном слое коллекторного перехода. Поэтому вполне понятно, что физики-исследователи твердого тела были вынуждены искать новый эффект в твердом теле, который в свою очередь дал резко улучшенный результат.

Принцип дрейфового транзистора теперь положен в основу всех конструкций высокочастотных транзисторов, так как признано целесообразным деление области полупроводниковых переходов на две резко различные, но однородные внутри себя части.

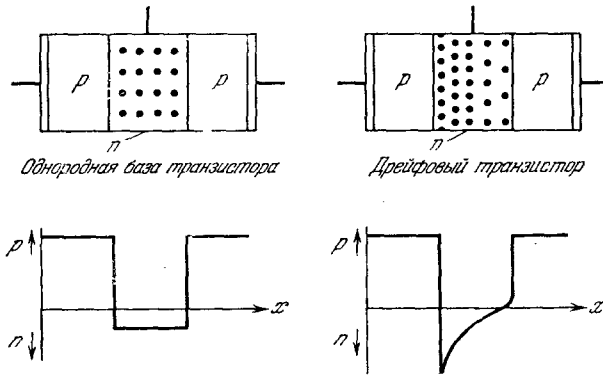


Рис. 12. Обычный и дрейфовый транзисторы; в последнем для достижения 5—10-кратного улучшения частотной характеристики производится управление неоднородностью примесей в базе.

Конечно, дрейфовый транзистор не единственный прибор, в котором можно использовать управляемую неоднородность примесей. Уже предложены принципы для изменения характеристики полупроводникового переменного конденсатора²⁴, для увеличения пробивного напряжения полупроводникового выпрямителя и для улучшения процесса удаления недостаточных носителей в полупроводниковых коммутирующих устройствах.

Попытаемся теперь заглянуть в будущее. Мы уже говорили о том, что в полупроводниках неоднородность кристаллической решетки может привести к изменению ширины запрещенной зоны в зависимости от расстояния²⁵. Если же найти какой-либо способ управления этим, то в твердом теле можно получить не просто электрическое поле дрейфового транзистора, а некую силу, которая действует на электроны и дырки в одном и том же направлении несмотря на то, что их заряды противоположны.

На рис. 13 показано различие между электрическим полем, создаваемым примесным изменением в зависимости от расстояния, и полем, создаваемым изменением ширины запрещенной зоны. (Конечно, когда на материал не действует какая-либо ЭДС, то возникающая электрическая сила точно контрсбалансирована силой диффузии, которая появляется вследствие все более возрастающей электронно-дырочной плотности во все уменьшающейся области запрещенной зоны.) Можно также показать, как другой вид изменения решетки создает квазиманнитное поле, которое отлично от любого магнитного поля, создаваемого но-

стоянными магнитами и электромагнитами²⁶. В силу того, что действие этого поля на электроны и дырки отличается от действия обычных электрических и магнитных полей, то такого рода поля названы квазиэлектрическими и квазимагнитными.

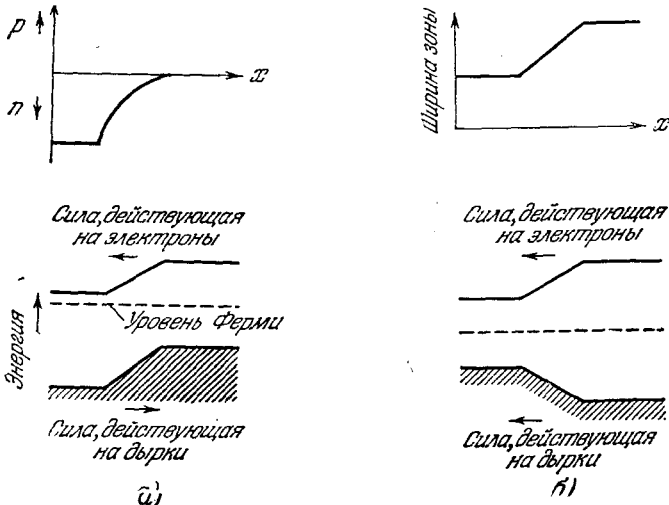


Рис. 13. Два типа управляемой неоднородности в полупроводниках. Диаграмма энергетических уровней показывает, как действует сила на электроны и на дырки:
 а) изменяется плотность примесей; б) изменяется ширина зоны.

Следует опровергнуть мнение о том, что идеи об управляемой неоднородности надуманы. Рассмотрим те результаты, которые были получены за последние несколько лет на сплавах кремния с германием;

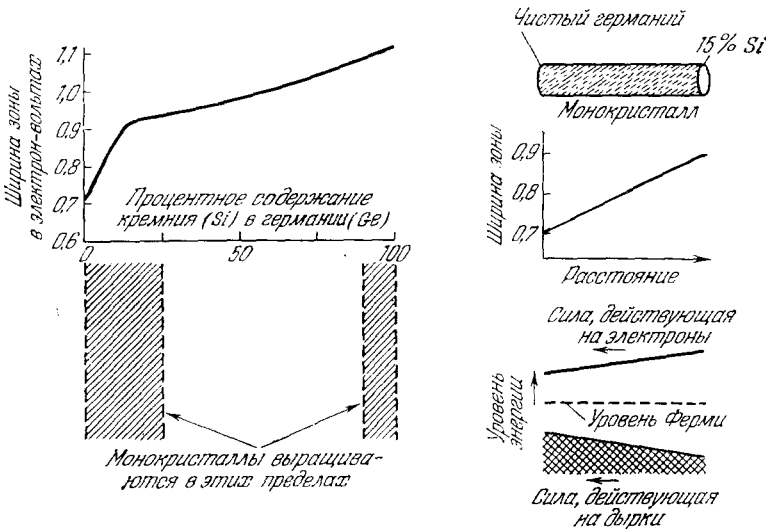


Рис. 14. Характеристики сплавов германия и кремния.

они показаны на рис. 14. Хотя и раньше было известно, что можно получить сплав германия с кремнием в любом процентном отношении, но только совсем недавно добились получения монокристаллов с содержанием 25% кремния в германии и 10% германия в кремнии²⁷. Более того,

были выращены монокристаллы длиной 25,4—50,8 мм, которые содержали на одном конце германий, постепенно переходящий на другом конце в 15% сплав кремния (см. рис. 14). Понятно, что свойства германиево-кремниевых сплавов постепенно изменяются в зависимости от их процентного содержания. В принципе, кроме большой длины, было получено нужное свойство для создания квазиэлектрического поля, притом все это было сделано в наиболее трудной для работы структуре—в монокристалле. Следует сказать, что германий и кремний далеко не единственные полупроводниковые материалы, где можно добиться таких же результатов. На таблице, помещенной на рис. 15, имеются данные по

III	IV	V
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

	Ширина запрещенной зоны	Повышенность		Постоянная решетки
		Электроны	Дырки	
Si	1,1	1900	500	5,42
AlP	3,0	—	—	5,44
Ge	0,7	3900	1900	5,62
Ga As	1,4	7000	300	5,62
Sn	0,1	10000	—	6,46
In Sb	0,2	80000	1200	6,46

Рис. 15. Таблица данных полупроводниковых сплавов из элементов III и V групп периодической таблицы в сравнении с их соседями из IV группы.

совершенно удивительному классу полупроводниковых сплавов, называемых сплавами III—V групп периодической таблицы Менделеева. Для каждого полупроводникового элемента, находящегося в IV группе, существует бинарный сплав, полученный из сочетания элементов из III и V групп, который имеет почти такую же постоянную решетки и структуру кристалла, как у цинковой обманки (сфалерит ZnS). Кристалл цинковой обманки является бинарным аналогом алмазоподобной кристаллической решетки германия и кремния. Ясно, что растворению арсенида галлия в германии или фосфида алюминия в кремнии не мешает какое-либо нарушение кристаллической решетки, хотя, конечно, могут при этом возникнуть другие трудности. Есть надежда, что в течение ближайших лет некоторые из новых материалов дадут новые средства для более удобного получения управляемой неоднородности.

Ясно, что управляемую неоднородность легче получить, если не требуется монокристалличность. Оставим пока полупроводники и рассмотрим в качестве примера несколько других элементов схемы. Тривиальным примером в области проводников является биметаллический (сталь—медь или сталь—алюминий) провод, который показан на рис. 16. В силу того, что переменный ток течет в основном по поверхности проводников, биметаллическая проволока является компромиссом, обеспечивающим прочность на разрыв по стальному сердечнику и имеющим

проводимость для переменного тока соответствующую внешнему проводнику—меди или алюминию. На границе резкого перехода от стального сердечника к наружному слою с высокой проводимостью в пограничном слое меди будут протекать очень слабые токи, а в пограничном

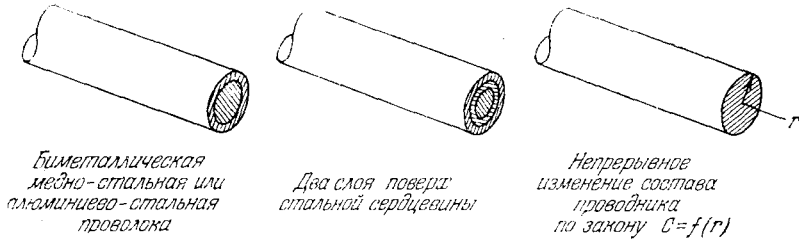


Рис. 16. Высокопрочные на разрыв электрические проводники с резким переходом от материала к материалу и проводник с непрерывной неоднородностью.

слое стали—очень сильные токи, что в обоих случаях очень плохо. Более удачным компромиссом было бы введение между стальным и медным слоями еще одного промежуточного слоя с более высокой прочностью на разрыв, чем у меди, и большей электропроводностью, чем у стали.

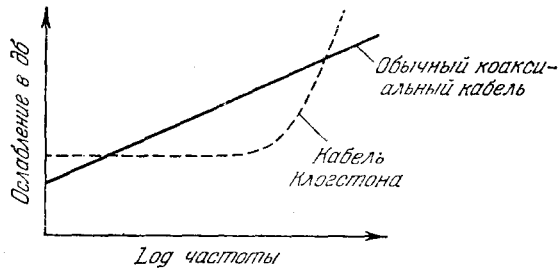
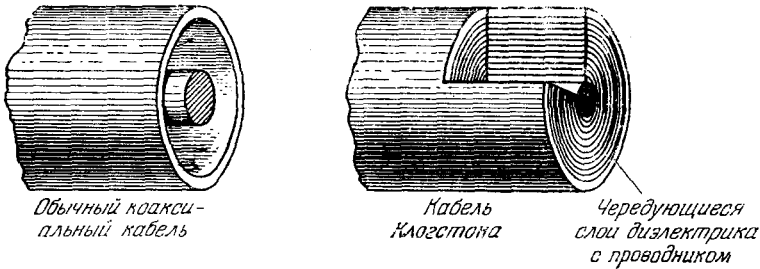


Рис. 17. Многослойный кабель Клогстона является успешной попыткой заполнить пространство между внутренним и наружным проводниками коаксиальной линии чем-то более полезным, чем воздух или диэлектрик.

И самым лучшим, но не могущим быть практически приемлемым и экономичным на сегодняшний день, хотя в принципе вполне возможным, компромиссом будет постепенное изменение состава проводника от центра к поверхности.

Возьмем другой пример. Многослойный кабель Клогстона (рис. 17) использует чередующиеся слои проводника с изолятором для того, чтобы получить высокочастотные потери кабеля, намного меньшие, чем у обычного коаксиального кабеля такого же диаметра²⁸ с воздушным

диэлектриком. Хотя по всему кабелю использованы резкие переходы от проводника к диэлектрику, но здесь ясно видна попытка заполнить пространство между внутренним и внешним проводниками чем-нибудь более лучшим, чем просто воздух или другой диэлектрик. В принципе его успех является еще одним примером удачного компромисса с ограничениями природы, полученного с помощью управляемой неоднородности.

Дадим пример компромисса из области ферритовых магнитных материалов. Изменяя состав феррита, можно получить разнообразные магнитные свойства. В магнитомягком феррите один состав дает высокую магнитную проницаемость, но низкую точку Кюри и малое электрическое сопротивление; другой состав дает высокую точку Кюри и высокое электрическое сопротивление, но это достигается за счет уменьшения

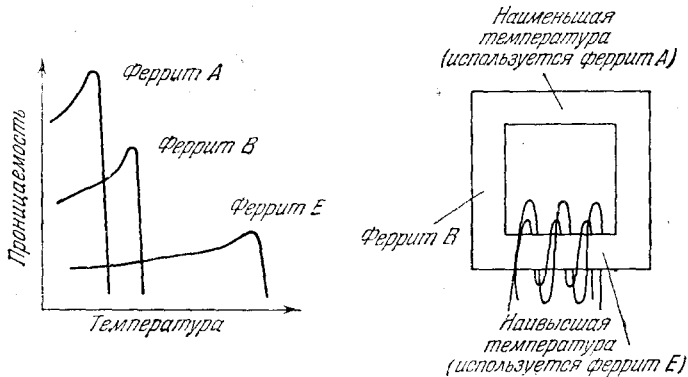


Рис. 18. Сердечник трансформатора, в котором потери в меди вызывают неравномерный нагрев, целесообразно изготовить из соответствующих ферритов с различными точками Кюри.

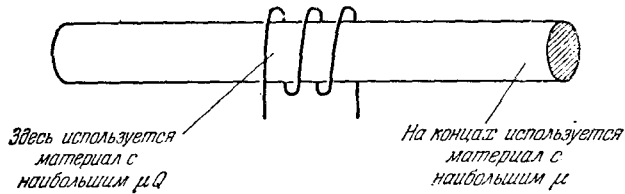
проницаемости, что видно из рис. 18. При изготовлении сердечника трансформатора первым компромиссным решением будет просто выбор одной из неоднородностей с четкими границами. Однако вполне понятно, что нельзя ожидать, чтобы магнитный поток оказался постоянным по всему сечению и длине магнитопровода, а если имеются потери в меди, вдоль магнитопровода температура будет также меняться. Более удачным компромиссом было бы создание такого сердечника, состав материала которого менялся бы, оставаясь для каждого участка сердечника оптимальным, как это показано на рис. 18.

Аналогичным примером правильного выбора неоднородности может служить ферритовая антенна (см. рис. 19). Постепенное изменение состава материала сердечника может значительно повысить эффективную чувствительность антенны без увеличения ее габаритов. Но при этом необходимо, чтобы наибольшее значение произведения μQ давал материал, находящийся под витками, в то время как удаленные концы сердечника в силу того, что они нужны для увеличения эффективного поперечного сечения захвата системы, состояли бы из феррита, имеющего наибольшую магнитную проницаемость. А так как концы феррита отчасти способствуют уменьшению потерь, то это создает дополнительные улучшения без какого-либо увеличения диаметра сердечника.

В таблице, помещенной на рис. 19, приводятся наиболее типичные опубликованные данные по ферритовым сердечникам антенн²⁹.

Объем настоящей статьи не позволяет рассмотреть другие примеры, но и ферритовые сердечники переключающих устройств и гираторы, и магнестрикционные устройства и термисторы, и пьезоэлектрические

кристаллы и ферроэлектрические приборы, и фотопроводящие приборы и т. д. и т. п. — все они имеют свои, им присущие неразрешенные проблемы. Только за счет использования управляемой неоднородности инженер-конструктор или технолог может внести в конструкцию такое свойство схемы, которое иным путем с наличными материалами получить невозможно. В свою очередь составитель электронной схемы получит такой результат, который он не смог бы получить при самом усердном пересоставлении схемы из имеющихся несовершенных приборов и деталей в течение долгих лет кропотливой работы. И окончательное распространение



Феррит		
	A (Ni Zn)	B (Mn Zn)
μ	4000	1500
μQ (1 Mc)	1600	10000

Рис. 19. Ферритовая рамочная антенна. Правильный выбор состава материалов может повысить эффективную чувствительность антенны без увеличения ее габаритов.

общего принципа неоднородности может привести к созданию очень сложного монолитного твердого тела, которое будет выполнять множество различных функций за счет имеющегося в нем различия молекулярной структуры, изменяющейся от точки к точке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дальнейшая работа над исследованием новых явлений в твердых телах: проводниках, диэлектриках, полупроводниках и магнитных материалах — позволит получить такие свойства схем, которые иным путем не могли быть получены вовсе.

Кроме того, надо сказать, что управляемая неоднородность в твердом теле является тем архимедовым рычагом, который создаст новые и необычные явления и, в конце концов, приведет к созданию единого монолитного элемента схемы, сочетающего в себе функции многих обычных элементов схемы и относящегося к ним монтажа.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. D. K. C. MacDonald, Electrical Conductivity of Metals and Alloys at Low Temperature, Handbuch der Physik, vol. XIV, Low Temperature Physics I, Springer, 1956.
2. D. Shoenberg, Superconductivity, Cambridge University Press, 2 Ed., 1952.
3. F. E. Terman, Radio Engineers' Handbook, pp. 34—35, McGraw—Hill, 1943.
4. A. B. Pippard, Metallic Conduction at High-Frequencies and Low Temperatures, Advances In Electronics and Electrom Physics, vol. VI, Academic Press, 1954.

5. F. E. Terman, *Radio Engineeris' Handbook*, p. 787—791, McGraw—Hill, 1943.
 6. D. A. Buck, *The Cryotron—A Superconductive Computer Component*, Proc. I.R.E., vol. 44, pp. 482—493, April 1956.
 7. J. Weber, *Amplification of Microwave Radiation by Substances not in Thermal Equilibrium*, Trans. Prof. Group on Electron Devices, I. R. E., vol. PGED-3, pp. 1—4, June 1953.
 8. J. P. Gordon, H. J. Zeiger and C. H. Townes, *The Maser—A New Type of Microwave Amplifier*, Frequency Standard and Spectrometer, Phys. Rev., vol. 99, pp. 1264—1274, August 15, 1955.
 9. J. P. Wittke, *Molecular Amplification and Generation of Microwaves*, Proc. I. R. E., vol. 45, pp. 291—316, March 1957.
 10. J. Combrisson, A. Honig, C. H. Townes, *Use of Spin Resonance for an Oscillator or Amplifier at Hyperfrequencies*, Comptes Rendus, vol. 242, pp. 2451—2453, May 14, 1956.
 11. H. E. Scovill, G. Feher and H. Seidel, *Operation of a Solid State Maser*, Phys. Rev., vol. 105, pp. 762—763, January 15, 1957.
 12. N. Bloembergen, *Proposal for a New Type Solid State Maser*, Phys. Rev., vol. 104, pp. 324—327, October 15, 1956.
 13. W. P. Mason, W. H. Hewitt and R. F. Wick, *Hall Effect Modulators and Gytrators Employing Magnetic-Field Independent Orientations in Germanium*, J. A. P., vol. 24, pp. 166—175, February 1953.
 14. R. F. Wick, *Solution of the Field Problem of the Germanium Gytrator*, J. A. P., vol. 25, pp. 741—756, June 1954.
 15. H. Weiss, *The Back-Coupled Hall Generator*, Zeits. f. Naturforschung, vol. 11a, pp. 684—688, September 1956.
 16. H. Welker, *Magnetic Barrier Layers in Germanium*, Zeits. f. Naturforsch., vol. 6a, p. 184, 1951.
 17. L. J. Giacoletto and J. O'Connell, *A Variable-Capacitance Germanium Junction Diode for V—H—F, Transistors I*, RCA Rev., 1956; also published in RCA Rev., vol. 16, pp. 68—85, March 1956.
 18. L. J. Kabbell and W. E. Evans, *A Transistor Subcarrier Generator for Color Receivers*, I. R. E. Transactions on Broadcast and TV Receivers, vol. BTR-1, pp. 9—13, July 1955.
 19. J. M. Manley and H. E. Rowe, *Some General Properties of Non-Linear Elements. Part I. General Energy Relations*, Proc. I. R. E., vol. 44, pp. 904—913, July 1956.
 20. A. W. Holt, *Electronic Design*, pp. 24—25, October 1954.
 21. H. Kroemer, *The Drift Transistor*, Transistors I, pp. 202—220, RCA Labs., 1956. (The first publication of the principle was in «Naturwissenschaften» vol. 40, p. 578, November 1953.)
 22. C. A. Lee, *A High-Frequency Diffused-Base Germanium Transistor*, B. S. T. J., vol. 35, pp. 1—22, January 1956.
 23. A. L. Kestenbaum and N. H. Ditrack, *The Design, Construction and High Frequency Performance of Drift Transistors*, RCA Rev., vol. 18, pp. 12—23, March 1957.
 24. L. J. Giacoletto, *Theoretical Junction Capacitance and Related Characteristics Using Graded Impurity Semiconductors*, I. R. E. Trans. P. G. E. D., to be published.
 25. H. Kroemer, *Band Structure of Semiconductor Alloys with Locally Varying Composition*, Bull. Amer. Phys. Soc., Series II, vol. 1, p. 143, March 15, 1956.
 26. H. Kroemer, *Quasi-Electric and Quasi-Magnetic Fields in Non-Uniform Semiconductors*, paper to be published.
 27. S. M. Christian, *The Growth and Properties of Single-Crystal Ge-Si Alloys*, paper to be published.
 28. A. M. Clogston, *Reduction of Skin Effect Losses by the Use of Laminated Donductors*, B. S. T. J., vol. 30, pp. 491—529, July 1951.
 29. C. Dale Owens, *A Survey of the Properties and Application of Ferrites Below Microwave Frequencies*, Proc. I. R. E., vol. 44, pp. 1234—1247, October 1956.
-