

Генератор Ганна

Одной из наиболее важных проблем современной твердотельной электроники является создание генераторов мощности электромагнитных колебаний коротковолновой части СВЧ-диапазона. Особо актуальна эта проблема в миллиметровом диапазоне. Генераторы Ганна по совокупности параметров являются в настоящее время одним из лучших твердотельных СВЧ генераторов:

- рабочие частоты до 200 ГГц,
- мощность генерации в непрерывном режиме достигает сотен мВт,
- генераторы Ганна обладают низкими шумами (10-15 дБ),
- имеют достаточно высокие значения КПД (до 30%),
- просты в эксплуатации и легко вводятся в рабочий режим, имеют малые питающие напряжения и др.

Учитывая, что перечисленные параметры и характеристики генераторов Ганна в ближайшем будущем могут быть значительно улучшены путем совершенствования технологии, переходом к новым материалам (в частности к InP), а также путем тщательного изучения физики процессов, происходящих в диодах Ганна, их можно считать наиболее перспективными твердотельными источниками СВЧ колебаний. Целью данной лабораторной работы является изучение физики эффекта Ганна и знакомство с работой диода Ганна в генераторе СВЧ-диапазона.

Эффект Ганна

В 1963 году сотрудник фирмы «IBM Corporation» физик-экспериментатор Дж. Ганн обнаружил, что если приложить постоянное электрическое поле E_0 , большее некоторого порогового значения $E_{\text{пор.}}$, к арсениду галлия или фосфиду индия n-типа, то наблюдаются периодические колебания тока, протекающего через образцы. Для GaAs $E_{\text{пор.}} \sim 3,2$ кВ/см, а для InP $\sim 10,5$ кВ/см. Этот эффект, получивший название «эффекта Ганна», сейчас широко используется для создания генераторов и усилителей СВЧ диапазона. Важной особенностью эффекта Ганна является то, что период колебаний тока приближенно равняется времени пролета электронов от катода к аноду и, таким образом, может варьироваться путем изменения длины образцов.

Годом позже Ганн установил, что периодические колебания тока, протекающего через образцы, связаны с периодическим возникновением у катода, движением, и исчезновением у анода доменов электрического поля. В том же 1964 году Кремер показал, что эффект Ганна может быть объяснен на основе модели механизма снижения дрейфовой скорости электронов с ростом электрического поля в полупроводниках типа n-GaAs, который был рассмотрен в 1961-1962 гг. Ридли, Уоткинсом и независимо от них Хилсумом. Суть механизма заключается в следующем. Зона проводимости GaAs, InP и некоторых других полупроводников имеет несколько минимумов, различающихся по значениям эффективной массы m^* и подвижности электронов μ . Причем более высокие долины имеют большее значение m^* и малую заселенность электронами в слабых полях, вследствие чего, с увеличением электрического поля, приводящего к переходу электронов из нижней долины в верхние, может происходить снижение средней дрейфовой скорости электронов. Таким образом, на зависимости $V_d(E)$ появляется падающий участок при $E > E_{\text{пор.}}$. При дальнейшем увеличении когда электроны в основном перейдут в верхние долины, наблюдается обычный рост V_d , характерный для верхних долин. Однако, вскоре было экспериментально установлено, что для GaAs и InP рост V_d , следующий за падающим участком, не наблюдается, что связано с интенсификацией рассеяния электронов с испусканием полярных оптических фононов. В результате $V_d(E)$ стремится к насыщению. Эта зависимость, характерная для GaAs и InP показана на рис. 1. На падающем участке зависимости дифференциальная подвижность $\mu = \frac{dV_d}{dE}$ (а, следовательно, и проводимость) становится отрицательной величиной. Состояние образца с отрицательной дифференциальной подвижностью нестабильно. Вследствие того, что $\mu < 0$, всякая флуктуация объемного заряда от равновесного значения не затухает со временем, а нарастает, что в конечном итоге и приводит к формированию доменов и, как следствие, обуславливает колебания тока, протекающего через образец. Обычно домен начинает формироваться у катода. Характерное время его формирования определяется временем диэлектрической (максвелловской) релаксации

$$\tau_m = \frac{\epsilon\epsilon_0}{qn\mu}.$$

Для того, чтобы в образце успел сформироваться стабильный домен, необходимо, чтобы время пролета электронов через активный слой длиной L от катода к аноду был больше

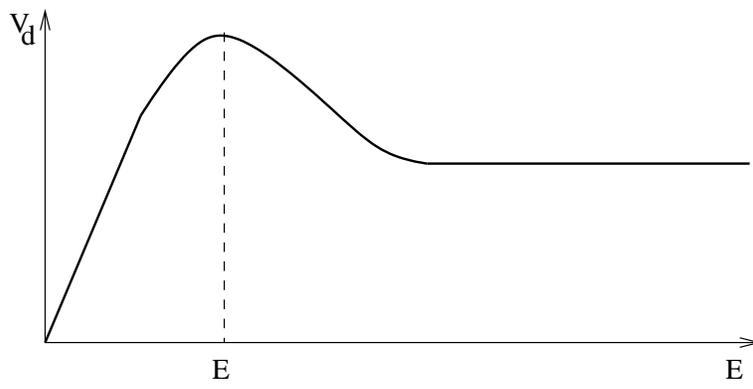


Рис. 1: Зависимость скорости электронов от напряженности электрического поля характерная для n-GaAs и InP.

τ_m , то есть:

$$\frac{L}{V_d} > \tau_m = \frac{\epsilon\epsilon_0}{qn\mu},$$

откуда следует, что

$$nL > \frac{\epsilon\epsilon_0 V_d}{q\mu}.$$

В правой части этого неравенства (его часто называют критерием Кремера) стоят константы, характеризующие полупроводник. Для n-GaAs и n-InP правая часть этого неравенства равна приблизительно 10^{12} см^{-2} . Если произведение $nL < 10^{12} \text{ см}^{-2}$, то распределение поля в образце устойчиво и домены не формируются.

Конструкция диода Ганна

По конструкции диод Ганна - это типичный СВЧ-диод в корпусе. В качестве примера на рис. 2 изображена патронная конструкция серийного диода Ганна, который используется в экспериментальной части этой работы. На кристаллодержатель 1 с «постаментом» 2

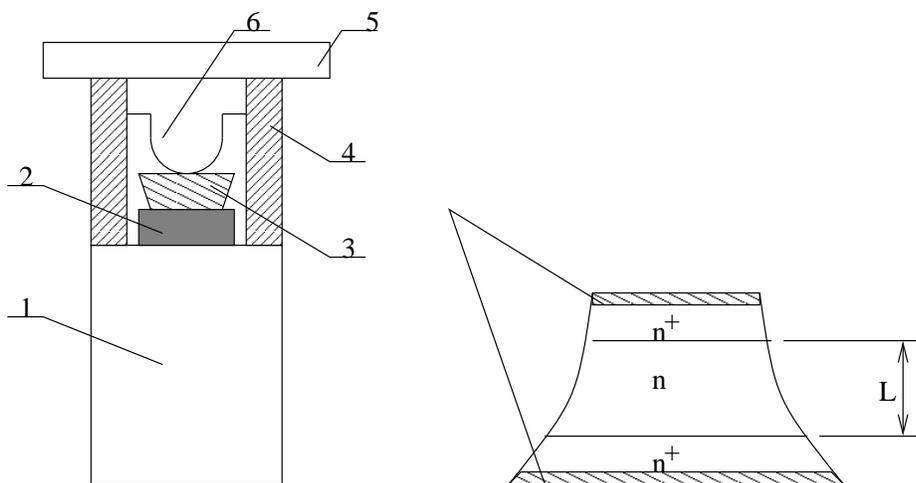


Рис. 2: Конструкция диода Ганна и полупроводниковая эпитаксиальная меза-структура, используемая в диодах Ганна

припаян кристалл полупроводника 3. Керамическая втулка 4 разделяет по постоянному току крышку 5 и кристаллодержатель. Золотой контакт 6 от крышки с помощью термокомпрессии присоединяется к верхнему омическому контакту кристалла. Сам кристалл полупроводника (см. рис.2) обычно представляет собой слоистую меза-структуру. Активный слой n, толщиной L, определяющей рабочую частоту диода Ганна, заключен между двумя высоколегированными областями n^+ , являющимися переходными для создания к ним омических контактов.

Режимы работы генераторов Ганна

Конструкция генератора Ганна СВЧ-диапазона представляет собой объемный резонатор, который в диапазоне СВЧ выполняет роль колебательного контура. В соответствующем месте резонатора помещен диод Ганна, на который предусмотрена возможность подачи постоянного питающего напряжения. Диод Ганна может использоваться для создания генераторов СВЧ диапазона благодаря отрицательной дифференциальной проводимости в определенном интервале прикладываемых напряжений. На рис. 3 показана вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода Ганна. При $U < U_{\text{пор}}$ диод практически представляет собой омическое сопротивление. При $U = U_{\text{пор}}$ образуется домен.

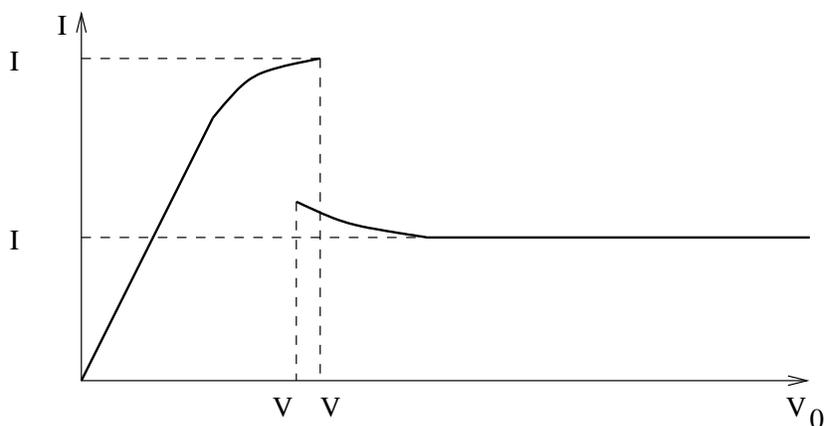


Рис. 3: ВАХ диода Ганна.

$I_{\text{пор}}$ и $U_{\text{пор}}$ — пороговые ток и напряжение, $I_{\text{нас}}$ — ток насыщения, $U_{\text{и}}$ — напряжение исчезновения домена.

Помещение диода Ганна в резонатор создает благоприятные условия для ганновских колебаний. При работе диода Ганна к нему, кроме постоянного напряжения, может прикладываться также СВЧ напряжение, возникающее в резонаторе за счет колебаний тока, протекающего через диод

$$U = U_0 + U_1 \sin(2\pi ft).$$

В настоящее время известны и достаточно хорошо изучены несколько основных режимов работы генераторов Ганна.

Доменные режимы

Для доменных режимов характерно наличие полностью сформировавшегося домена в течение значительной части периода генерируемых колебаний. Изменяя сопротивление нагрузки, можно получить три различных доменных режима.

Пролетный режим

Этот режим существует при работе на малую нагрузку, которая порядка сопротивления самого диода при малых (допороговых) напряжениях, когда амплитуда колебаний напряжения мала и не оказывает заметного влияния на образование и движение доменов. Частота пролетных колебаний определяется в основном толщиной активного слоя диода L и может быть приближенно рассчитана по формуле:

$$f_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{дм}}}{L},$$

где $V_{\text{дм}}$ — скорость движения доменов. С повышением питающего напряжения $f_{\text{пр}}$ несколько падает из-за уменьшения скорости движения доменов. Ток через диод Ганна в этом случае равен току насыщения $I_{\text{нас}}$, на который наложены узкие всплески, связанные с коротковолновым повышением тока при втягивании очередного домена в анод и образованием нового домена. КПД генератора в этом режиме обычно низок и не превышает долей процента.

Режим с задержкой домена.

Этот режим реализуется, когда диод Ганна нагружен на параллельный колебательный контур, резонансное сопротивление которого достаточно велико, чтобы минимальное напряжение на диоде $U_{\text{min}} = U_0 - U_1$ опустилось ниже порогового $U_{\text{пор}}$, но все же осталось выше $U_{\text{и}}$ (рис. 4а). В этом случае домен, как и в пролетном режиме, исчезает, достигнув анода. Однако, в этот момент напряжение на диоде оказывается ниже $U_{\text{пор}}$. Новый домен не образуется, и диод ведет себя как омическое сопротивление до тех пор, пока напряжение не станет равным $U_{\text{пор}}$. Период колебаний тока T определяется суммой времени пролета домена и времени задержки домена. Частота генерации определяется настройкой контура. В этом состоит качественное отличие данного режима от пролетного.

Режим с гашением домена

При увеличении резонансного сопротивления контура режим с задержкой домена переходит в режим с гашением домена. Этот переход сопровождается скачком мощности и небольшим изменением генерируемой частоты, обусловленным изменением реактивного сопротивления диода Ганна. Режим с гашением домена возможен, когда в процессе движения, домена к аноду мгновенное напряжение на диоде Ганна падает ниже $U_{\text{и}}$ (см. рис.4б). В этом случае домен быстро рассасывается, не успев дойти до анода и рабочая точка переходит на восходящую ветвь ВАХ. Частота колебаний в этом режиме может быть как больше, так и меньше пролетной и, также, как и в предыдущем режиме, может перестраиваться резонатором.

Режим ограниченного накопления объемного заряда (ОНОЗ)

Для реализации режима ОНОЗ необходимо выполнение следующих двух условий. Во-первых, частота СВЧ колебаний напряжения достаточно велика, так что в часть периода, когда $U > U_{\text{пор}}$, домены не успевают формироваться, и зависимость тока от напряжения повторяет кривую $V_d(E)$. Во-вторых, амплитуда переменного напряжения на диоде Ганна должна быть достаточно велика, чтобы некоторую часть периода t_s напряжение на диоде было меньше порогового (см. рис.5). Когда $U > U_{\text{пор}}$, ток через диод падает с ростом

напряжения, и диод отдает мощность в СВЧ цепь. Когда $U < U_{\text{пор.}}$, диод является пассивным элементом. За время t_s происходит рассасывание объемного заряда, накопленного за время активной части периода $(T - t_s)$. Достоинством режима ОНОЗ является высокий уровень генерируемой мощности и возможность плавной перестройки частоты генератора в широких пределах с помощью перестройки резонатора. Однако, введение в этот режим является далеко не простой задачей, и, кроме того, спектр выходного сигнала генератора Ганна в ОНОЗ-режиме получается хуже, чем в доменных режимах.

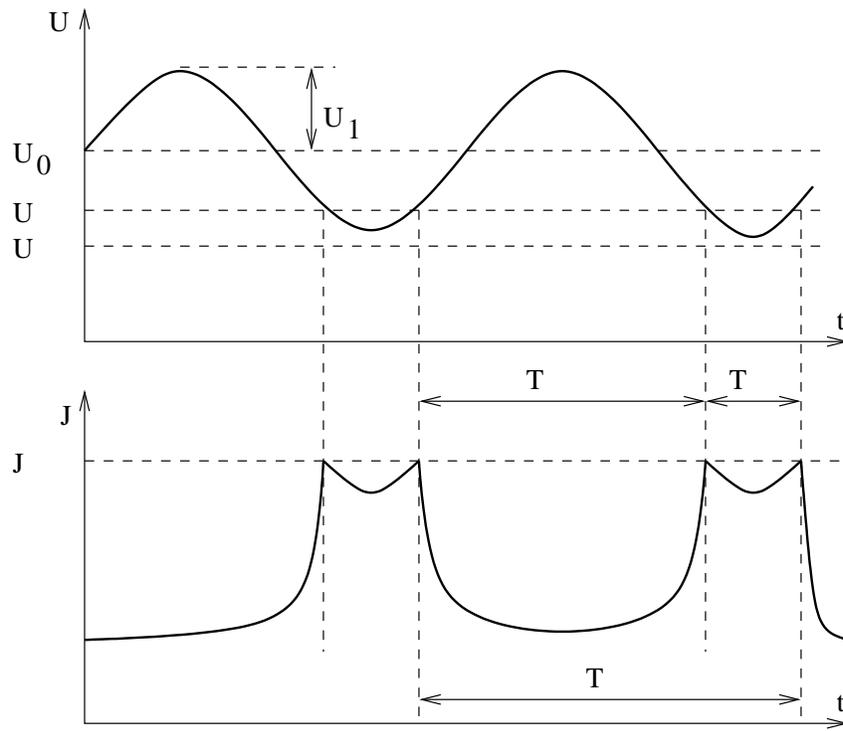
Гибридные режимы

Эти режимы занимают промежуточное положение между режимом ОНОЗ и доменными режимами, когда период напряжения в резонаторе сравним с обратным временем формирования домена. Поэтому, в отличие от режима ОНОЗ, в гибридном режиме в течение части периода колебаний в структуре диода существует достаточно большой неравновесный пространственный заряд, обычно имеющий вид одного или нескольких дипольных доменов. В последние годы ведутся работы по исследованию других режимов генерации гармоник, а также двухчастотной генерации. Но пока они изучены значительно слабее описанных выше и природа их существования до конца не выяснена. Анализ динамики зарядов в структуре диода Ганна из GaAs позволил получить численные критерии работы генераторов Ганна. Переход из доменного режима в режим ОНОЗ происходит при выполнении следующих неравенств:

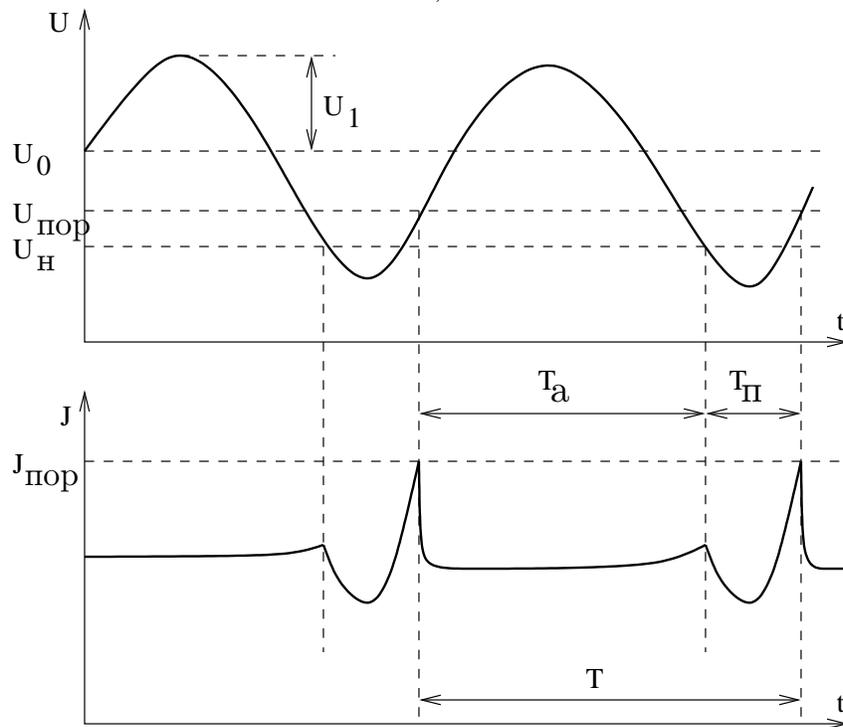
$$\frac{n_0^{\frac{1}{2}}}{L^{\frac{1}{2}} f_c} \ll 0,13 \text{ см}^{-2} \text{ с (при } n_0 \ll 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}\text{);}$$

$$\frac{n_0^{\frac{3}{4}}}{L^{\frac{1}{2}} f_c} \ll 370 \text{ см}^{-\frac{11}{4}} \text{ с (при } n_0 \gg 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}\text{),}$$

где n_0 — равновесная концентрация электронов в активной области, L — длина активной области, f_c — рабочая частота. Если вместо знака « \ll » в реальном случае получается обратный знак, то есть « \gg », то генератор работает в доменном режиме, если « $=$ », то в гибридном режиме.



a)



б)

Рис. 4: Зависимости напряжения U и тока I через диод от времени t : а — для режима с задержкой домена, б — для режима с гашением домена. T_a — активная часть периода T , $T_{п}$ — «пассивная» часть периода

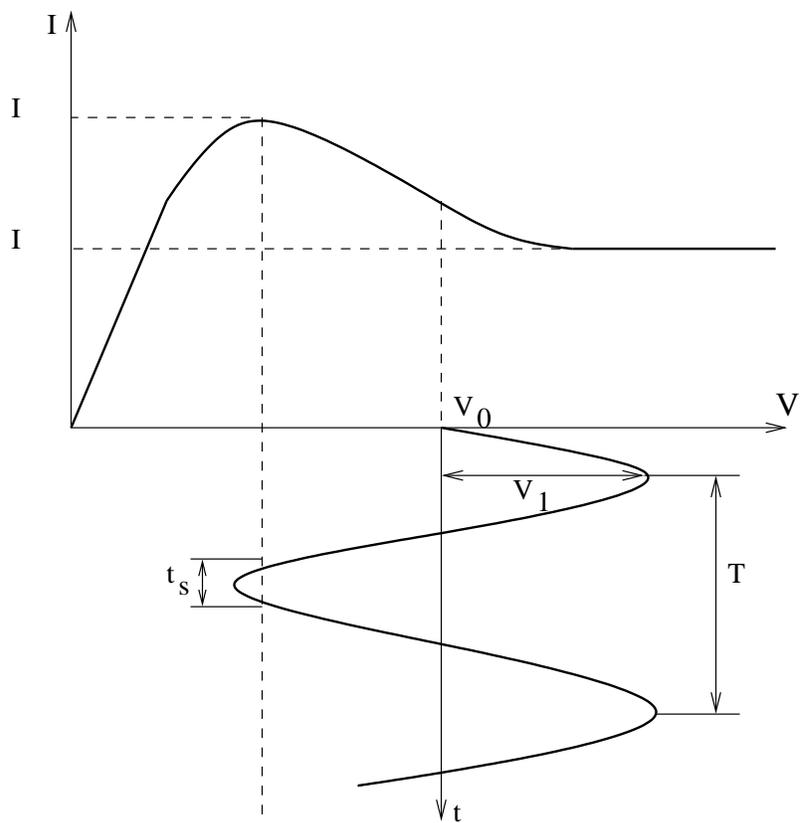


Рис. 5: Принцип работы диода Ганна в режиме ОНОЗ

Основные параметры генераторных диодов Ганна

Генераторные диоды Ганна относятся к группе диодов СВЧ и характеризуются рядом параметров, к которым относятся:

- $P_{\text{вых. min}}$ и $P_{\text{и вых. min}}$ — минимальные непрерывная и импульсная выходные мощности,
- η — коэффициент полезного действия,
- $U_{\text{пор.}}$ — постоянное пороговое напряжение,
- r — сопротивление диода Ганна при малых напряжениях ($U < U_{\text{пор.}}$),
- $I_{\text{р}}$ и $I_{\text{ир}}$ — постоянный и импульсный рабочие токи,
- $\frac{df}{f}$ — относительная полоса частот.

Схема измерительной установки

На рис.6 показана топология волноводной секции генератора Ганна вместе со схемой питания диода Ганна. Диод (ДГ) размещен в волноводном резонаторе. Фильтр нижних частот (ФНЧ) служит для предотвращения утечки СВЧ мощности из резонатора в низкочастотную часть схемы. Короткозамыкающий поршень (КЗ) предназначен для настройки резонатора. Емкость $C = 10$ мкФ предотвращает возбуждение низкочастотных колебаний в цепи питания. Схема питания ДГ содержит переменные резисторы $R_2 = 2$ кОм и $R_1 = 47$ кОм для плавной регулировки постоянного напряжения, питающего диод, а также измерительные приборы для измерения постоянного тока и напряжения на ДГ. На рис.7 изображена схема СВЧ части измерительной установки. СВЧ мощность от генератора на ДГ через направленный ответвитель (НО) с переходным затуханием 10 дБ поступает в согласованную нагрузку. Десятая часть мощности, проходящей в согласованную нагрузку, ответвляется к измерительным приборам: измерителю мощности (ИМ) Я2М-66 и к анализатору спектра П.Ч. С4-27.

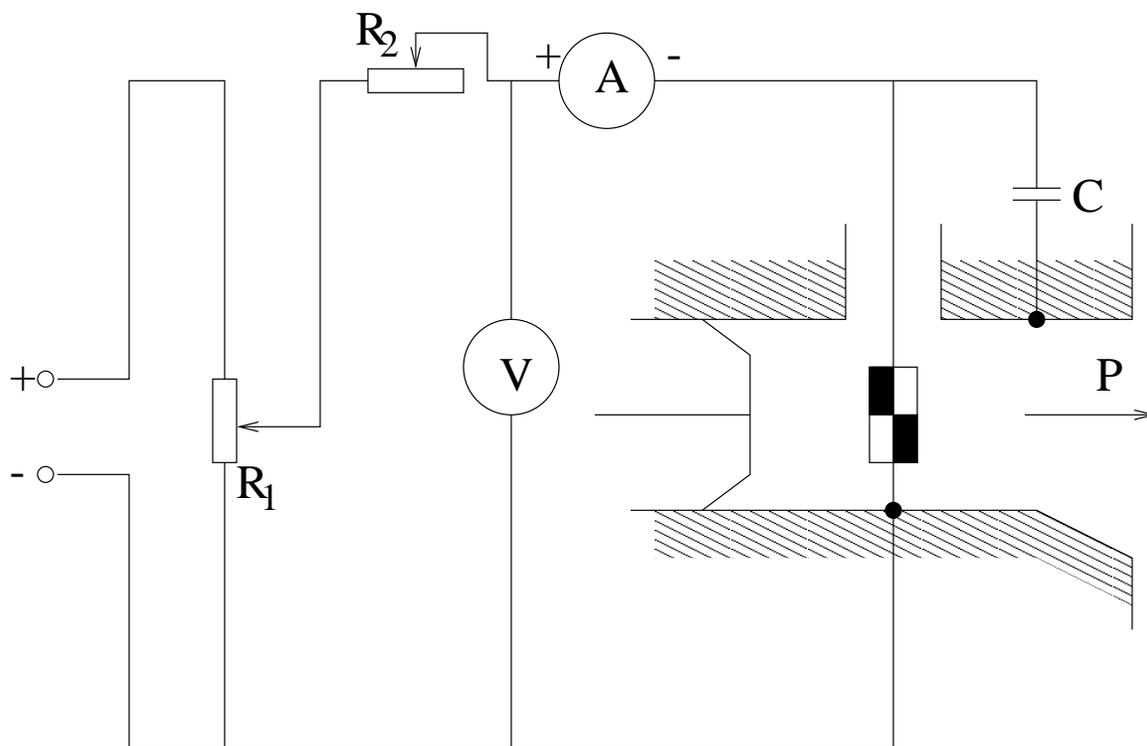


Рис. 6: Схема питания диода Ганна

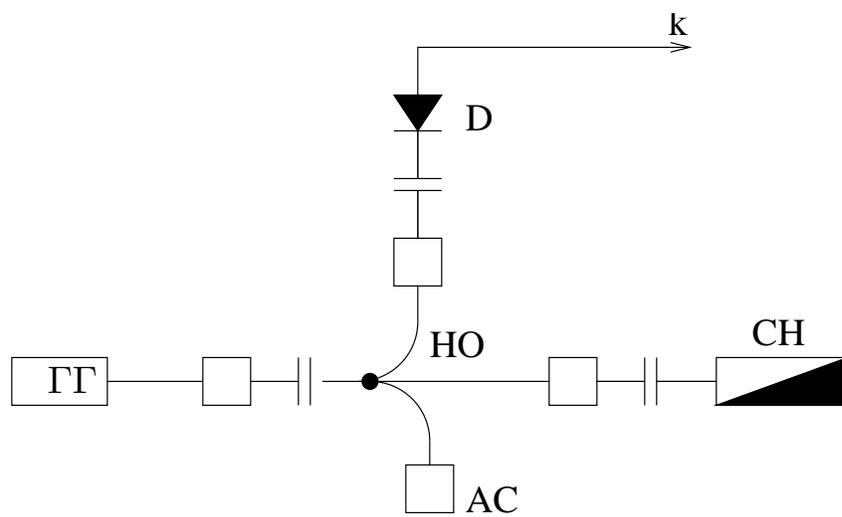


Рис. 7: Схема измерительной установки

Задание

1. Ознакомиться со схемой питания диода Ганна, схемой установки и измерительными приборами, комплектующими установку.
2. Собрать установку и снять ВАХ диода Ганна. Построить график зависимости $I(U)$. Рассчитать величину r . Определить величину $U_{\text{пор}}$.

! Напряжение на диоде Ганна не должно превышать 3 В.

3. Пользуясь ваттметром поглощаемой мощности МЗ-53 и направленным ответвителем с переходным затуханием 10 дБ. снять зависимость выходной мощности генератора от напряжения $P(U)$. Построить график.
4. Рассчитать максимальный коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_{\text{ген}}}{P} \cdot 100\% = \frac{P_{\text{ген}}}{UI} \cdot 100\%$$

5. Определить величину частоты генерации. для этого:
с помощью ручки “НАСТРОЙКА” в блоке СВЧ совместить максимальный отклик от сигнала с центральной меткой. В этом случае частота сигнала f_c будет равна:

$$f_c = M_f + (M - 1) \cdot 160 \text{ МГц},$$

где f — частота в МГц, отсчитанная по шкале “1,9–3,9”, M — номер гармоники (в нашем случае $M = 10$).

6. Выяснить режим работы генератора Ганна с учетом определенной выше частоты генерации и следующих данных:
 $n_0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $L = 3\text{--}5 \text{ мкм}$.

Литература

- [1] Пасынков В.В., Чиркин Л.К., Шинков А.Д. Полупроводниковые приборы. — М.:Высш.шк., 1987.
- [2] Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Сов.радио, 1980.
- [3] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. — М.:Мир, 1984, т.2.

Приложение А

Влияние света на эффект Ганна

М.Шур. "Современные приборы на основе арсенида галлия".

4.18. Влияние освещения на эффект Ридли-Уоткинса-Хилсума-Ганна (стр.237).

Влияние света на эффект Ганна зависит от того, освещается весь образец или только часть его. Если образец освещается полностью то возможны два случая.

1. Когда энергия фотонов больше ширины запрещенной зоны, генерируемые носители распределены по образцу равномерно. В этом случае уменьшается относительная неравномерность в распределении электронов (связанная с неоднородностями легирования) и, следовательно, увеличивается степень когерентности и амплитуда ганновских колебаний.
2. Когда энергия фотонов такова, что электроны могут перейти в зону проводимости с глубоких донорных уровней. При этом неравномерность в распределении генерируемых светом электронов, связанная с неоднородным распределением примесных центров, может увеличить неравномерность распределения электронов проводимости вдоль образца, что снижает когерентность ганновских колебаний.

Интересные эффекты, связанные с локальными изменениями проводимости вследствие подсветки, наблюдаются при освещении лишь части образца. Если освещается область вблизи анода и интенсивность света достаточно высока для того, чтобы заметно повысить проводимость в этой области, то могут наблюдаться два различных эффекта.

1. Напряженность поля вблизи анода уменьшается вследствие вызванного подсветкой повышения проводимости, и домен сильного поля может рассасываться при входе в освещенную область (создание виртуального анода). Путь, проходимый доменом от точки зарождения до точки рассасывания, уменьшается, а частота колебаний увеличивается. На рис.А.1 показана зависимость времени пролета домена от длины неосвещенной (активной) области образца. Наименьшая эффективная длина, при которой колебания еще наблюдались, составляла 80 мкм, что соответствует произведению $(n_0L) = 1.67 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Это значение несколько превышает критическую длину (n_0L) , полученную из критерия Крамера.
2. Другой эффект, описанный в литературе, состоит в возбуждении светом ганновских колебаний. Если приложенное напряжение несколько ниже порогового значения, то увеличение проводимости под влиянием освещения в области анода приводит к увеличению поля вблизи катода. Увеличение поля до значений, превосходящих пороговое, приведет к формированию домена и возбуждению ганновских колебаний. Если длительность импульса света значительно больше, чем время пролета домена, то колебания будут существовать до тех пор, пока освещается образец. Если длительность

светового импульса меньше, чем время пролета домена, сформировавшийся домен доходит до анода, а новый домен не возникает. Таким образом, освещение коротким импульсом света дает одиночный импульс тока.

Освещение прикатодной области уменьшает поле вблизи катода и, как следствие, подавляет формирование доменов при напряжениях выше порогового.

Описанные эффекты могут найти применение в оптоэлектронных приборах.

Пример: импульсы света мощностью 0.3 мВт и длительностью 1 нс обеспечивали (за счет возникновения движущегося домена) сигнал мощностью 300 мВт на нагрузке 50 Ом.

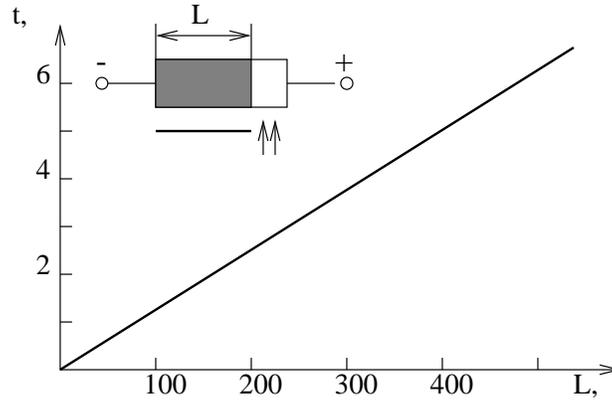


Рис. А.1: Зависимость времени пролета домена от длины неосвещенной (активной) области образца.