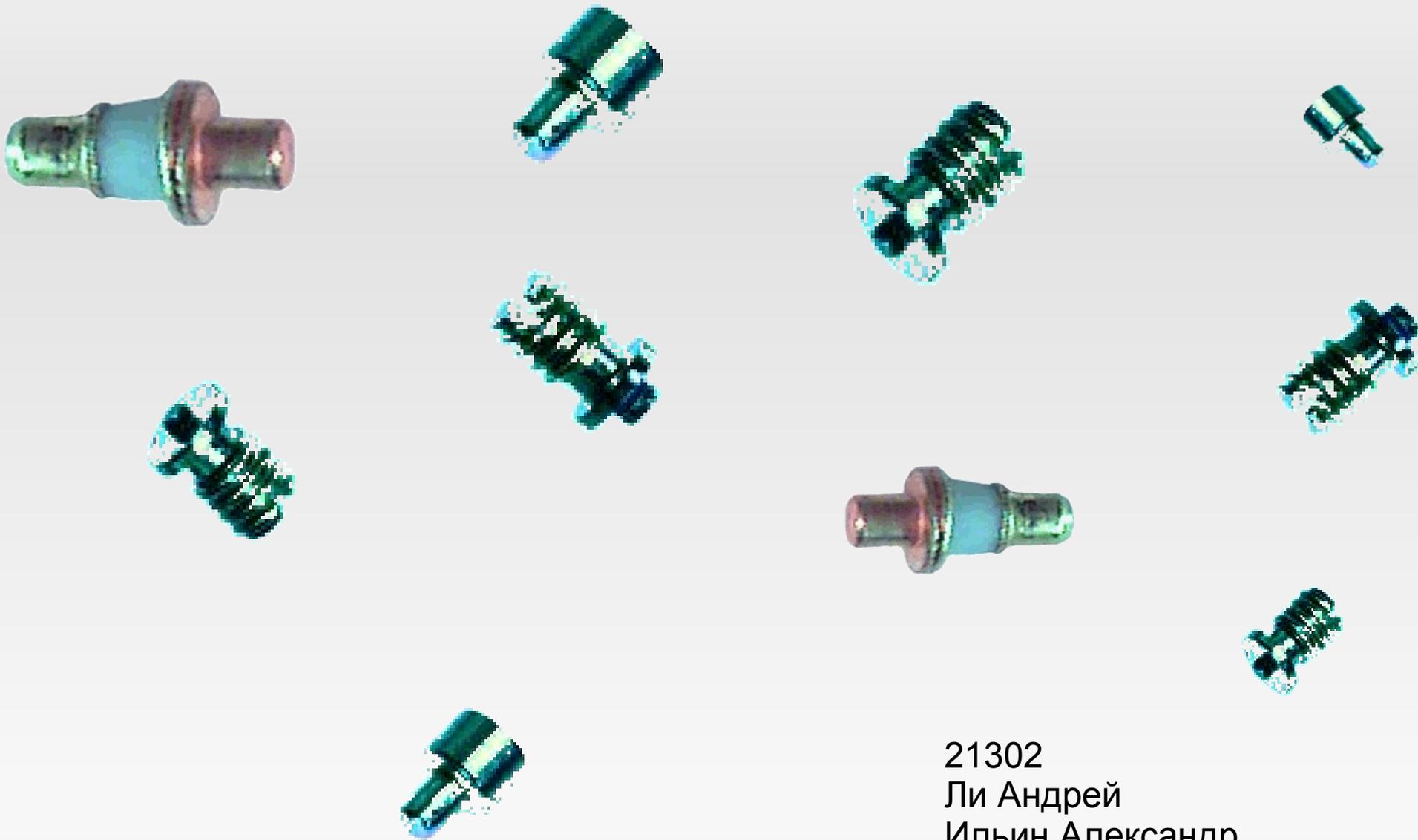


# Диоды Ганна



21302  
Ли Андрей  
Ильин Александр

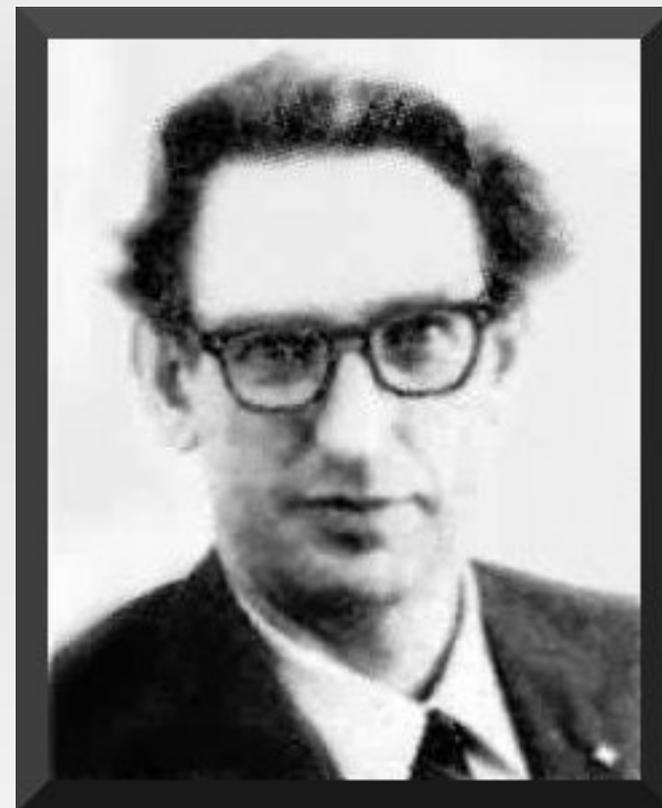
# Джон Бэттискомб Ганн

Джон Бэттискомб Ганн

(John Battiscombe Gunn)

13 мая 1928 – 2 декабря 2008

Был членом Национальной  
Инженерной Академии США.

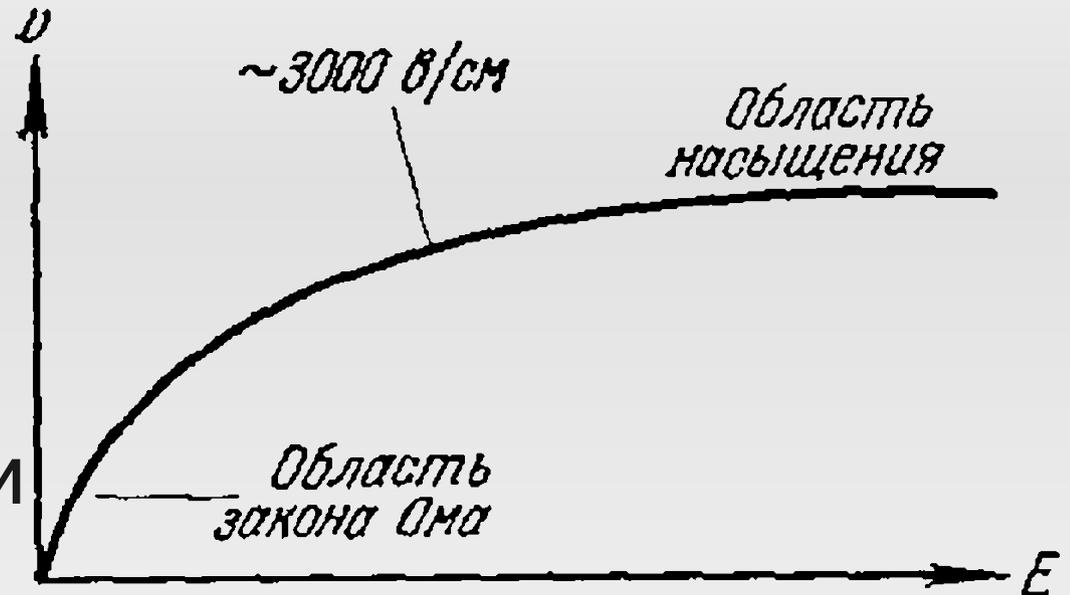


В 1969 получил премию IEEE имени Морриса Либмана

# Открытие эффекта Ганна

Ганн пытался объяснить наличие области насыщения в зависимости дрейфовой скорости электронов от

величины электрического поля, действующего поперёк полупроводникового образца.



# Открытие эффекта Ганна

После двух лет исследований германия, который является неполярным полупроводником, Ганн решил провести подобные опыты с каким-нибудь полярным соединением из элементов III и V групп. В таких веществах присутствуют дополнительные электрические поля, влияющие на прохождение электронов через решётку. Единственным достаточно доступным на тот момент материалом был арсенид галлия.

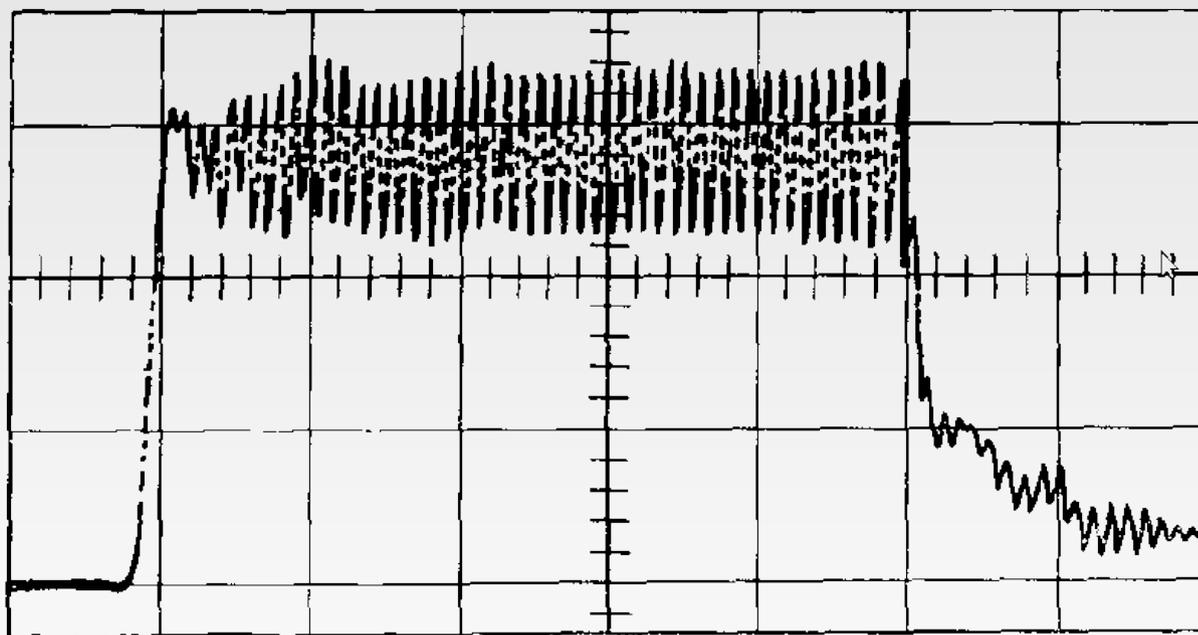
# Открытие эффекта Ганна

Ганн ожидал увидеть сходную с германием, но менее чётко выраженную картину. Однако при напряжённости поля  $1000 \div 2000$  В/см вместо обычного изменения тока с напряжением, он увидел совершенно беспорядочные скачки тока вверх и вниз.



# Поиск возможного применения

При уменьшении длины образца с 5 мм до 0.2 мм ток начинал изменяться более регулярным образом. Однако стабильным ток не стал.

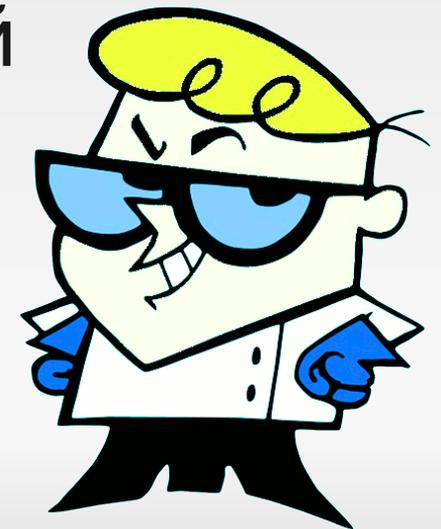


# Поиск возможного применения

Дальше нужно было попытаться заставить прибор работать в непрерывном режиме. При относительно длительной работе образец перегревался. Образец был сделан предельно тонким + однажды из-за попадания случайных примесей кристалл стал обладать меньшей плотностью электронов. Генератор функционировал целую неделю, что вполне доказывало его стабильность.

# Как это работает

Объяснение полученным Ганном результатам нашли учёные Ридли и Уоткинс из Исследовательской лаборатории Мулларда и Хилсам из Службы электронных исследований в Англии. Они предположили, что при воздействии поля электроны могут переходить из области с меньшей эффективной массой в область с большей, что объясняет наличие области отрицательного сопротивления.



# Условия возникновения эффекта

Эффект наблюдается в двухдолинных полупроводниках.



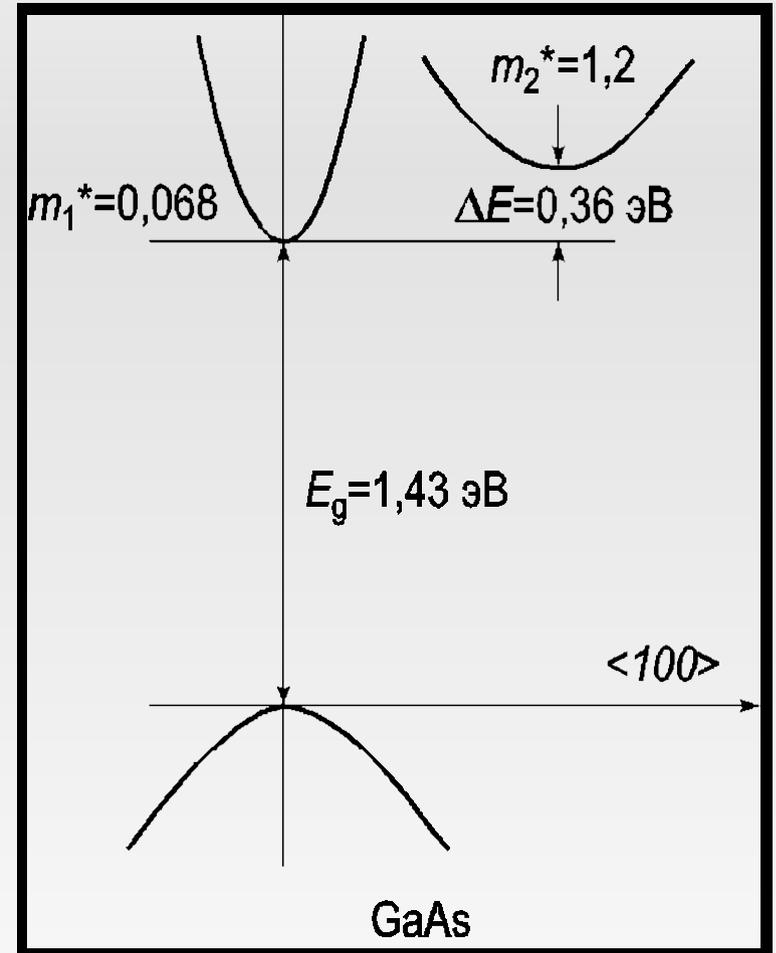
$$E_{\text{тепл}} \ll \Delta E$$



$$\Delta E < E_g$$



$$\mu_1 > \mu_2, m_1 < m_2$$



С ростом поля  
возрастает скорость  
дрейфа электронов.

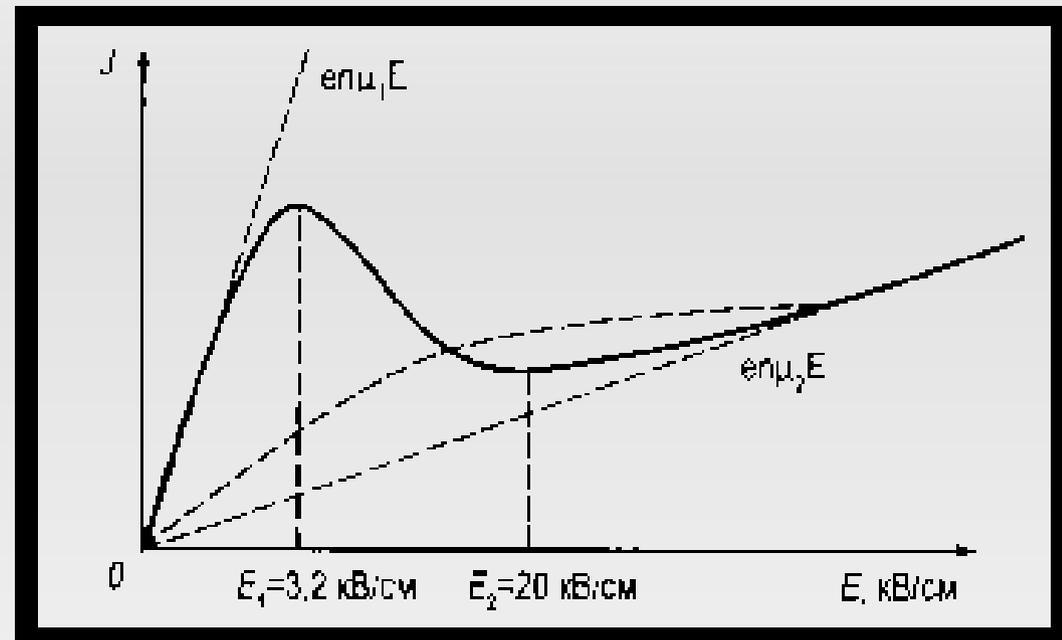
При пороговом  
значении  $E_p$

появляются  
электроны,

способные переходить в верхнюю долину  
зоны проводимости. Переход

сопровождается ростом  $m^*$ . На ВАХ при  
этом

появляется участок с ОДС.



# Статическая ВАХ GaAs

Получим зависимость скорости дрейфа электронов от поля для случая ОДС.

Продифференцируем

$$J = e(n_1\mu_1 + n_2\mu_2)E = en_0v_D(E)$$

по E:

$$\frac{dJ}{dE} = en_0 \frac{dv_D}{dE}$$

Условие существования ОДС

$$\frac{dv_D}{dE} \equiv \mu_D < 0$$

# Статическая ВАХ GaAs

Распределение электронов по долинам:

$$\frac{n_2}{n_1} = \left( \frac{E}{E_0} \right)^k \equiv F^k$$

Отношение подвижностей:

$$\frac{\mu_2}{\mu_1} \equiv B$$

Концентрации  $n_1$  и  $n_2$ :

$$n_1 = n_0 (1 + F^k)^{-1} \quad n_2 = n_0 F^k (1 + F^k)^{-1}$$

Получаем выражение для средней дрейфовой скорости

$$v_D(E) = \frac{J}{en_0} = \frac{e(n_1\mu_1 + n_2\mu_2)E}{e(n_1 + n_2)} = \frac{(n_1\mu_1 + n_2\mu_2)E}{n_1 + n_2} = \frac{\mu_1 E (1 + BF^k)}{1 + F^k}$$

# Статическая ВАХ GaAs



# Статическая ВАХ GaAs

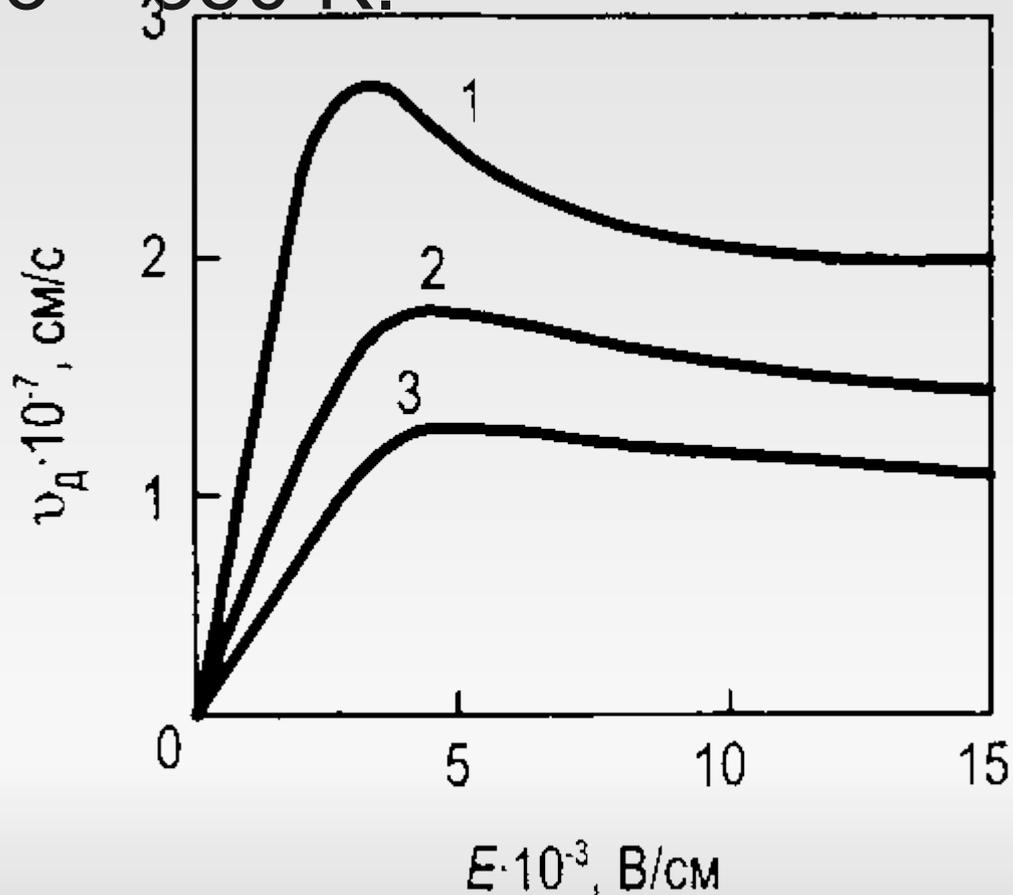
$v_d$  будет зависеть также от электронной температуры  $\Rightarrow$  и от температуры вещества.

$$v_d(E) = \frac{\mu_1 E}{1 + \left(\frac{M_2}{M_1}\right) \left(\frac{m_2^*}{m_1^*}\right)^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_{21}}{kT_e}\right)}$$

$$T_e(E) = T + \frac{2e\tau_e \mu_1 E^2 / (3k)}{1 + \left(\frac{M_2}{M_1}\right) \left(\frac{m_2^*}{m_1^*}\right)^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_{21}}{kT_e}\right)}$$

# Статическая ВАХ GaAs

Зависимость дрейфовой скорости электронов в GaAs от  $E$  при:  $T_1 = 200$  К,  $T_2 = 300$  К,  $T_3 = 350$  К.



# Зарядовые неустойчивости

$$E = E_{\text{п}}$$

Пусть вследствие тепловой



флуктуации группа электронов сместилась в сторону катода относительно неподвижных ионизированных доноров. Избыточная концентрация электронов изменяется во времени следующим образом:

$$\Delta n(t) = \Delta n(0) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{М}}}\right)$$

Время релаксации Максвелла:

$$\tau_{\text{М}} = \frac{\varepsilon_{\text{r}} \varepsilon_0}{\sigma} = \frac{\varepsilon_{\text{r}} \varepsilon_0}{en_0 \mu_1}$$

# Зарядовые неустойчивости

Но в нашем случае подвижность следует заменить отрицательной дифференциальной подвижностью, соответствующей участку ВАХ с отрицательной дифференциальной проводимостью.

$$\tau_M = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{en_0 \mu_-}$$

Получается, что первоначальная флуктуация концентрации электронов будет не убывать, а расти, так как  $\mu_- < 0$ .

# Зарядовые неустойчивости

Ширину домена можно определить исходя из того, что падение напряжения на образце до и после образования домена одно и то же:

$$U = E_{И} W = E_{Д} d_{Д.М.} + E_{В} (W - d_{Д.М.})$$

Исходная напряжённость поля  $E_{И} = E_{П}$ ,  $W$  – длина образца.

$$d_{Д.М.} = \frac{E_{И} - E_{В}}{E_{Д} - E_{В}} W$$

Время пролёта домена:

$$t_{пр} = \frac{W}{v_{Д}}$$

# Зарядовые неустойчивости

Чтобы первоначальная флуктуация концентрации электронов заметно возросла, необходим интервал времени, превышающий  $\tau_m$ . Периодическое изменение тока будет возникать при  $t_{гр} > \tau_m$  или:

$$n_0 W > \frac{\epsilon_r \epsilon_0 V_D}{e |\mu|}$$

Критерий Кремера

Для GaAs и InP правая часть неравенства это примерно  $10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

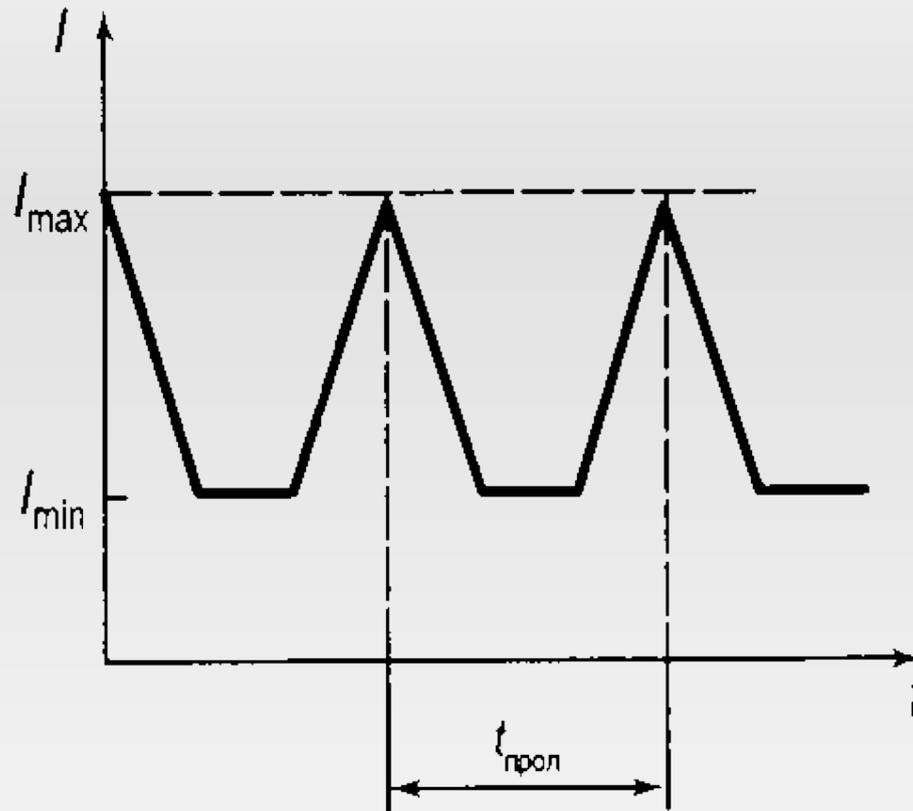
# Пролётный режим работы

Режим работы, при котором выполняется неравенство

$$n_0 W > 10^{12} \text{ см}^{-2}$$

называется пролётным режимом. Для его реализации необходимо включить диод в параллельную резонансную цепь, например в СВЧ генератор, настроенный на пролётную частоту ( $f = v_d / W$ ). Если длина образца значительно больше ширины домена, наблюдаются резкие всплески тока.

# Пролётный режим работы



Для получения формы колебаний, близкой к синусоидальной, нужно уменьшить длину образца или увеличить ширину домена.

# Режим подавления домена

Если СВЧ-поле меняется во времени по гармоническому закону, а резонатор настроен на частоту выше пролётной, то при достаточной амплитуде поля домен может рассосаться, не дойдя до анода. Для этого нужно, чтобы в полупериод, когда векторы напряжённости постоянного и СВЧ-поля противоположны, суммарная напряжённость поля была меньше  $E_p$ , а длительность полупериода больше времени релаксации.

# Режим подавления домена

Последнее условие можно с точностью до численного коэффициента записать так:

$$\frac{n_0}{f} > \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{e \mu_1}$$

В этом режиме в каждый в каждый "положительный" полупериод поля зарождается домен, а в каждый "отрицательный" домен рассасывается на пути к аноду. Таким образом, генерация происходит на частоте, определяемой параметрами резонансной цепи.

# Режим ограничения объёмного заряда

Для этого режима необходимо одновременное выполнение двух условий:

$$\frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{e \mu_1} < \frac{n_0}{f} < \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{e |\mu|}$$

В полупериод, когда  $E > E_p$ , домен сильного поля не успевает полностью сформироваться, а в следующий полупериод ( $E < E_p$ ) он полностью рассасывается. Результатом является эффективная генерация на частоте, определяемой параметрами внешней цепи.

# Генерация СВЧ-колебаний

Как любой СВЧ-генератор, диод Ганна характеризуется такими параметрами как:



Мощность



Длина волны/частота



КПД



Уровень шумов

# Мощность

Выходная непрерывная мощность генераторов Ганна в пролётном режиме обычно составляет десятки-сотни милливатт, а при импульсной работе достигает сотен ватт. Мощность можно следующим образом связать с частотой:

$$P = \frac{U^2}{Z} = \frac{E^2 I^2}{Z} = \frac{E^2 v^2}{Z f^2} = \frac{E^2 v^2}{Z} \cdot \frac{1}{f^2}$$

# Частота

Наиболее высокая частота колебаний в диодах Ганна была достигнута в образце GaN (3 ТГц). Генераторы из InP способны генерировать колебаний частотой до 170 ГГц. Верхний предел для GaAs составляет 50 ГГц. Определяющим фактором для данного параметра является дрейфовая скорость электронов в материале.

Коэффициент полезного действия генераторов Ганна может быть различным (от 1% до 30%), так как технологии изготовления приборов и качество исходного полупроводникового материала существенно различаются.

# Шумы

Наличие неоднородностей в кристалле может менять время рождения домена и расстояние от анода. Вследствие этого частота может меняться, то есть могут возникать частотные шумы.

Также могут возникать амплитудные шумы, основной причиной возникновения которых являются флуктуации дрейфовой скорости электронов.



*That's all Folks!*