

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭФФЕКТ ГАННА
В ПОЛУПРОВОДНИКАХ ТИПА $GaAs$ В СЛУЧАЕ
ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Р.К.ГАСЫМОВА

Бакинский Государственный Университет

Ruhi_qrk@mail.ru

В полупроводниках типа $GaAs$ исследуется эффект Ганна при наличии внешнего сильного магнитного поля. Найдена зависимость частоты возникающей волны от магнитного поля. Определено критическое значение магнитного поля, при котором исчезают колебания тока.

I. Введение. Колебательный процесс во внешнем электрическом поле в двухдолинных полупроводниках типа $GaAs$ впервые изучен Ганном [1]. Излучение энергии со сверхвысокой частотой ($\omega \sim 10^9 \div 10^{11}$ герц) происходит, начиная с определенного значения внешнего постоянного электрического поля.

Почти во всех теоретических исследованиях эффект Ганна изучен только вблизи порога, т.е. в точке перехода, когда $\sigma_d \approx 0$. Однако, когда проводимость становится отрицательной, т.е. $\sigma_d < 0$, распределение электрического поля E в кристалле становится неоднородным и образуются резко выраженные области электрического поля, т.е. «домены». При этом амплитуда начинает зависеть от времени и теоретическое исследование этого эффекта является непростой задачей. В работах [2-5] численно исследуются генерация колебаний тока в системах пониженной размерности, обусловленной наличием областей с отрицательной дифференциальной проводимостью в вольтамперных характеристиках и изучается связь периода колебаний с границами домена.

Однако, в этих работах не изучено влияние внешнего магнитного поля на колебания тока в линейном и нелинейном приближениях.

В данной работе построена нелинейная теория эффекта Ганна при наличии внешнего сильного магнитного поля при отрицательной дифференциальной проводимости ($\sigma_d < 0$).

На основе полученных формул были построены графики зависимости частоты колебаний тока от величины электрического и магнитного полей.

II. Основные формулы и вычисление амплитуды и частоты колебания тока.

Плотность тока в двухдолинных полупроводниках типа $GaAs$ состоит из двух частей

$$I = I_1 + I_2, \quad (1)$$

где I_1, I_2 - плотности тока в первой и во второй долинах, соответственно.

Для плотности тока в кристалле в присутствии внешних электрического \vec{E}_0 и магнитного \vec{H}_0 полей можно записать:

$$\vec{I} = e n \mu \vec{E} + e n \mu' \left[\vec{E} \vec{H} \right] + e D \vec{\nabla} n + e D' \left[\vec{\nabla} n \vec{H} \right], \quad (2)$$

где $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'(r, t)$, $\vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{H}'(r, t)$, $n = n_0 + n'$, $I = I_0 + I'$, $\vec{E}'(r, t)$, $\vec{H}'(r, t)$ - переменное электрическое и магнитное поля в кристалле, зависящие от координат и времени, соответственно, e - заряд электрона, μ - омическая подвижность, D - омический коэффициент диффузии, $\mu' H$ - холловская подвижность, $D' H_0$ - холловский коэффициент диффузии, n - концентрация носителей тока.

Для внешних электрического и магнитного полей выберем следующую геометрию: $\vec{H}_0 = H_0 \vec{h}$, $\vec{E}_0 = E_0 \vec{i}$, (\vec{h} , \vec{i} - единичные векторы вдоль осей z и x , соответственно).

В одномерной геометрии полный ток не должен зависеть от координаты и должен равняться току во внешней цепи:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(I + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) = 0, \quad (3)$$

здесь ε - диэлектрическая проницаемость.

В отсутствие внешних полей концентрации носителей заряда и, следовательно, плотности токов в долинах удовлетворяют условиям $n_2 \ll n_1$, $I_2 \ll I_1$. Следует отметить, что число носителей тока в нижней долине будет равно некоторой доле $f(E)$ от полного числа носителей тока, т.е

$$n_1 = f(E) n(E) \quad (4)$$

где $f(E) = (m-1)/(m-1+(E/E_a)^2)$ - параметр, зависящий от поля [6], E_a - напряженность электрического поля, при котором начинается колебание тока, E - значение электрического поля в кристалле, а параметр m находится из эксперимента, и представляет собой отношение омического тока к фактическому току в точке $E_0 = E_a$, где E_0 - внешнее постоянное электрическое поле при $\sigma_d = 0$, а $m = 3, 4, 5$ [6].

С учетом формул (1) и (2) из уравнения (3) получим следующие уравнения для определения частоты колебания внутри кристалла

$$\frac{\partial^2 R}{\partial t^2} - \frac{\sigma_0 k_x D' \alpha}{u_0} \frac{\partial R}{\partial t} + \left\{ m \alpha \sigma_0 \left(\frac{c}{\mu_0 H_0} \right)^2 (k_x u_0 + k_x^2 D') - \sqrt{2} \sigma_0 k_x u_0 \left(\frac{c}{\mu_0 H_0} \right) \right\} R = 0, \quad (5)$$

здесь $R = n'/n_0$, $\sigma_0 = e n_0 \mu_0$ - омическое значение проводимости, μ_0 - омическая подвижность, $u_0 = \mu_0 E_0$ - дрейфовая скорость, k_x - компонента волнового

вектора вдоль оси x , L_x -размер кристалла, α - безразмерный параметр, который в сильном магнитном поле порядка единицы [7].

Уравнение (5) получено для случая классически сильного магнитного поля (т.е. $\mu_0 H / c \gg 1$).

Предполагая, что R пропорциональна $e^{-i\omega t}$, из уравнения (5) получим дисперсионное уравнение вида:

$$\omega^2 - i \frac{\sigma_0 k_x D' \alpha}{u_0} \omega - \sigma_0 k_x u_0 \varphi \left[m \alpha \varphi \left(1 + \frac{k_x D'}{u_0} \right) - \sqrt{2} \right] = 0, \quad (6)$$

где $\varphi = c / \mu_0 H_0$.

Решая уравнение (7) получим следующие значения для частоты колебания тока:

$$\omega_{1,2} = \Omega \{ i \pm (B - 1)^{1/2} \} = \pm \omega_{1,2}^0 + i\Omega, \quad (7)$$

где $\Omega = \sigma_0 k_x D' \alpha / 2u_0$, $B = 2u_0^2 \varphi / \Omega D' \alpha [m \alpha \varphi (1 + k_x D' / u_0) - \sqrt{2}]$, $\gamma = i\Omega$ - инкремент нарастания волны, $\omega_{1,2}^0 = \pm \Omega \sqrt{B - 1}$ - реальная часть частоты.

Таким образом, при наличии внешнего магнитного поля $\mu_0 H / c \gg 1$ в полупроводниках типа *GaAs* возникает волна с частотой, модуль которой равен:

$$\omega = \Omega \sqrt{B}. \quad (8)$$

На основе формулы (8) была построена зависимость частоты колебания от величины электрического (рис. 1) и магнитного (рис.2) полей. При построении графиков были использованы следующие известные из экспериментов данные: $D = 130 \text{ см}^2 / \text{с}$, $\mu = 10^4 \text{ см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$, $n = 10^{14} \text{ с}^{-1}$, $e = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ эл. - стат. ед.}$, $L = 0,1 \text{ см}$, $m = 3$.

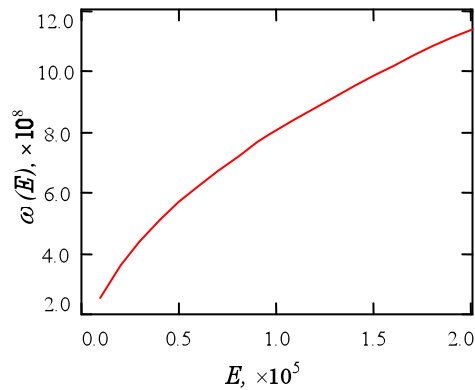


Рис.1. Зависимость частоты колебания тока ω от величины электрического поля E , при $\varphi = 0,5$ ($\varphi = c / \mu_0 H_0$).

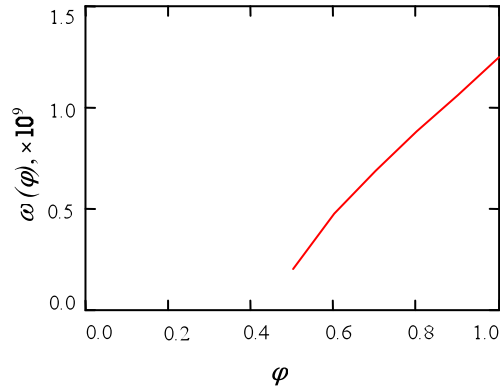


Рис.2. Зависимость частоты колебания тока ω от величины магнитного поля $\varphi = c / \mu_0 H_0$, при $E = 6,5 \text{ кВ} / \text{см}$.

Как видно из рис.1, с увеличением электрического поля частота колебания тока увеличивается, в то время с увеличением магнитного поля частота колебания тока уменьшается (рис.2). Причем существует критическое значение магнитного поля, при котором исчезают колебания тока.

Подставляя полученное значения частоты колебаний в выражение для относительной неравновесной концентрации носителей тока $R = n' / n_0$, получим:

$$R = A(t) \cos[\Omega(B-1)^{1/2} t + \theta] \quad (9)$$

Из выражения (9) видно, что внутри кристалла имеют место гармонические колебания с амплитудой, зависящей от времени, для нахождения явной зависимости которой от значений внешних полей E_0, H_0 нужно решить нелинейную задачу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gunn I. B. // IBM Journ. Res. Developm., 1964, №8, p.141-143.
2. Расулова Г.К., Брунков Н.П., Жуков А.Е., Устинов В.М. // ФТП, 2006, №40, в. 7, с.846-849.
3. Бирюлин П.И., Горбачевич А.А., Капаев В.В., Копаев Ю.В., Трофимов В.Т.// ФТП, 2001, 35, в. 11, с. 1356-1360.
4. Kastrup J., Hey R., Ploog K.H., Grahn H.T., Bonilla L.L., Kindelan M., Moscoso M., Wasker A., Galan J.// Phys.Rev. 1997, b, 55, p.2476-2480.
5. Sanchez D., Bonilla L.L., Platero G.// Phys. Rev. 2001, b, 64, p.114311-114315.
6. Engelman R.W., Quate G.F.// IEEE Trans, 1966, E.D. 13, p.88-94,.
7. Давыдов Б.И.// ЖЭТФ, 1937, №7, с.1069-1077.

GaAs TIPLİ YARIMKEÇİRİCİLƏRDƏ MƏNFİ DİFFERENSİAL KEÇİRİCİLİK HALINDA MAQNİT SAHƏSİNİN QANN EFFEKTİNƏ TƏSİRİ

R.K.QASIMOVA

XÜLASƏ

GaAs tipli yarımkeçiricilərdə xarici güclü maqnit sahəsi olduqda Qann effekti tədqiq edilmişdir. Yaranan dalğa tezliyinin maqnit sahəsindən asılılığı tapılmışdır. Cərrəyan rəqslərinin itdiyi maqnit sahəsinin böhran qiyməti təyin olunmuşdur.

INFLUENCE OF A MAGNETIC FIELD ON GUNN EFFECT IN *GaAs*-TYPE SEMICONDUCTORS WITH NEGATIVE DIFFERENTIAL CONDUCTIVITY

R.G.QASIMOVA

SUMMARY

The article investigates Gunn effect in the presence of an external strong magnetic field in *GaAs* - type semiconductors. Dependence of frequency of wave on a magnetic field is determined. The article also defines the critical value of a magnetic field at which current oscillations disappear.