

О ДВИЖЕНИИ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ПЛАЗМЫ n -InSb В МАГНИТНОМ ПОЛЕ, ОБРАЗОВАННОЙ ЛОКАЛЬНОЙ УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ

М. К. Балакирев, С. Д. Лучинин

Известно, что в n -InSb при 77°K в достаточно сильных скрещенных электрических и магнитных полях ($E \sim 200$ в/см, $\omega_c^b \tau_e \gg 1$, $\omega_c^h \tau_h < 1$, где $\omega_c^{e,h}$, $\tau_{e,h}$ – циклотронные частоты и времена релаксации электронов и дырок соответственно), возникает неустойчивость тока и напряжения, которая сопровождается СВЧ излучением [1]. Природа этой неустойчивости и механизм излучения до настоящего времени окончательно не выяснены. В данном сообщении делается попытка связать порог возникновения неустойчивости с рождением и движением плазменных возмущений, которые образуются благодаря локальной ударной ионизации в высокополевой области у одного из контактов. Существование такой области связано с граничными условиями для электрического поля на торцевых контактах и холловских гранях образца [2].

Неравновесные носители, возникшие в результате ударной ионизации в высокополевой области у катода, образуют возмущение плотности, которое может перемещаться во внешнем электрическом поле с амбиполярной скоростью. Абсолютное значение и направление скорости движения возмущения будет существенно зависеть от величины магнитного поля. Эту зависимость в области однородного электрического поля легко получить, определив в помощью стандартной методики [3] значения холловского поля E_x и амбиполярной подвижности в продольном направлении μ_a^* :

$$E_x = \frac{E_y H_z (\mu_e \mu_e^* n_0 - \mu_h \mu_h^* p_0)}{n_0 \mu_e^* + p_0 \mu_h^*}, \quad (1)$$

$$\mu_a^* = \frac{\mu_e^* \mu_h^* (n_0 - p_0)}{n_0 \mu_e^* + p_0 \mu_h^*} - \frac{H_z \mu_e^* \mu_h^* (\mu_h n_0 + \mu_e p_0) (\mu_e \mu_e^* n_0 - \mu_h \mu_h^* p_0)}{(n_0 \mu_e^* + p_0 \mu_h^*)^2}, \quad (2)$$

где

$$\mu_{e,h}^* = \frac{\mu_{e,h}}{1 + \mu_{e,h}^2 H_z^2}.$$

Из (2) видно, что μ_a^* сильно зависит от величины H_z и при некоторых значениях $H_z > H_z^{кр}$ может менять знак. Для n -InSb с пренебрежимо малой концентрацией равновесных дырок критические зна-

чения холловского E_x^{KP} и магнитного H_z^{KP} полей, при которых $\mu_\sigma^* < 0$, будут определяться условием:

$$\operatorname{tg} \phi^{KP} = - \sqrt{\left| \frac{\mu_e}{\mu_h} \right|} = \frac{E_x^{KP}}{E_y} . \quad (3)$$

В рассматриваемом случае распределение E_x и E_y (продольное электрическое поле) неоднородно и, согласно [2], может быть представлено в виде:

$$E_x \cong \left(\frac{2}{\pi} \right) \left(\frac{h}{r} \right)^\ell |E_\infty| [\theta(1-\ell) \cos \theta + \sin \theta], \quad (4)$$

$$E_y \cong \left(\frac{2}{\pi} \right) \left(\frac{h}{r} \right)^\ell |E_\infty| [\theta(1-\ell) \sin \theta - \cos \theta], \quad (5)$$

где $|E_\infty| = + \sqrt{E_x'^2 + E_y'^2}$, $\ell = 2\phi/\pi$,

E_x' , E_y' – продольное и холловское поля в центре образца, r , θ – полярные координаты точки, где рассчитывается поле, если центр полярной системы координат находится в вершине высокополевого угла.

Как видно из (4) и (5), E_x и E_y имеют сильные противоположные градиенты в продольном направлении, что при $H_z > H_z^{KP}$ приводит, согласно (3), к возникновению "поверхности разрыва", которая имеет форму цилиндра с осью z и образующей r^{KP} , $\theta^{KP} = f(H_z)$. Эта поверхность разделяет все плазменные возмущения по направлению их перемещения, причем все неравновесные носители во внутренней области, ограниченной поверхностью разрыва и гранями образца, двигаются с $\mu_\sigma^* > 0$, а вне этой области – с $\mu_\sigma^* < 0$.

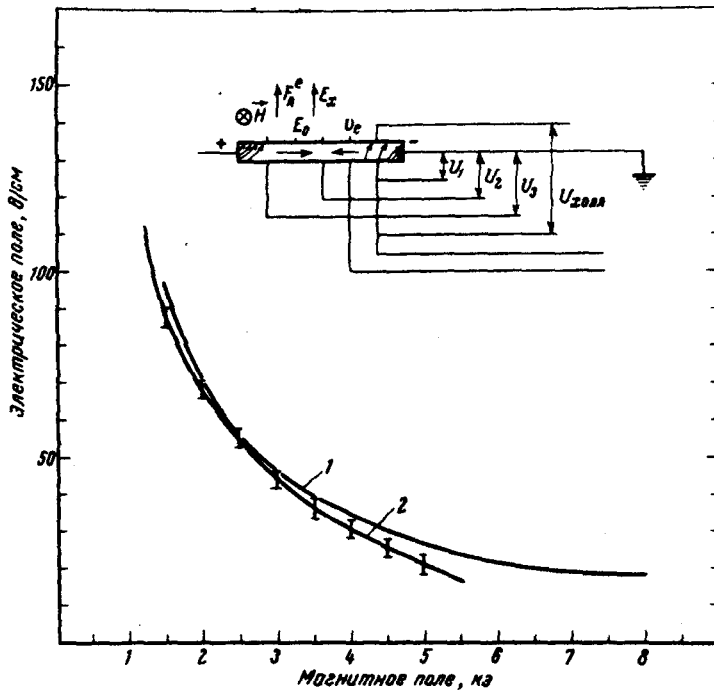
Если предположить, что механизм образования неравновесных носителей связан только с ударной ионизацией, то пороговое электрическое поле для процесса заполнения образца плазмой со стороны катода должно совпадать с пороговым полем для ударной ионизации на "поверхности разрыва". Последнее можно определить, используя результаты теории [4] и принимая во внимание решения (4), (5) относительно r^{KP} , $\theta^{KP} = f(H_z)$ при условии (3):

$$E_y' = \pi \ell (\hbar \omega_{\text{опт}})^{1/2} / 2^{\ell-1/2} m_e^*{}^{1/2} \left(\frac{h}{r} \right)^\ell \mu_e [\theta^{KP 2} (1-\ell)^2 + 1]^{1/2}, \quad (6)$$

где $\hbar \omega_{\text{опт}}$ – энергия полярных оптических фононов, m_e^* – эффективная масса электрона, h – толщина образца в холловском направлении. При выводе (6), так же как и в [4], предполагалось, что избыточные носители генерируются "убегающими электронами" с помощью ударной ионизации при условии $W_e > \hbar \omega_{\text{опт}}$ где W_e – энергия электронов, количество которых велико вследствие сильной анизотропии полярного рассеяния. Энергия электронов W_e определялась из решений уравнений движения в точках на "поверхности разрыва", что

допустимо при условии, когда масштаб неоднородности значительно превосходит длину свободного пробега электронов.

В режимах, когда выполняются необходимые условия для ударной ионизации, одновременно с большим запасом выполняются условия для интенсивного возбуждения различных плазменных неустойчивостей, которые могут быть ответственны за СВЧ излучение. В частности, согласно оценкам [5], наиболее вероятно возбуждение сильных колебаний типа дырочного звука. Поэтому представляется возможным, что влияние интенсивных дырочно-звуковых волн на описанный выше механизм переноса неравновесных носителей приведет к появлению неустойчивости, которая наблюдалась в работах [6, 7].



Пороговые поля $E_y^c = f(H_z)$ для неустойчивости наблюдавшейся в работах [6, 7], и схема для экспериментального измерения E_y^c . Кривая 1 – расчетная пороговая характеристика для $\mu_e = 7 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$, $\mu_h = 10^4 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$, кривая 2 – экспериментальная пороговая характеристика

Для проверки приведенных рассуждений был поставлен эксперимент по определению пороговых полей $E_y^c = f(H_z)$ неустойчивости, которая наблюдалась в работе [6]. Результаты и схема эксперимента показаны на рисунке. Образец $n\text{-InSb}$ с размерами $0,4 \times 0,8 \times 9 \text{ мм}^3$ вырезался из кристалла с концентрацией доноров $n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью $\mu_e = 6 \div 9 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$. К холловским граням вдоль образца припаивалось пять контактов на расстоянии 1,5 мм один от

другого. Образец при температуре 77°К помещался в поперечное магнитное поле. Электрическое поле в центре образца находилось с помощью измерения напряжения на последовательных участках образца, как показано на рисунке. Порог неустойчивости по электрическому и магнитному полям фиксировался по характерному "срыву" напряжения на ближайших к катоду холловских контактах. Наличие "срыва" свидетельствовало о начале ударной ионизации в приконтактной области. В таком режиме на второй паре контактов высокополевой грани образца наблюдался слабый подъем напряжения длительностью 10 нсек. Дальнейшее увеличение напряжения на образце приводило к развитию неустойчивости в форме дрейфующего домена сильного поля [6]. Как видно из сравнения кривых 1 и 2, результаты численного расчета $E_y' = f(H_z)$ (кривая 1) по формуле (6) хорошо совпадают с экспериментом (кривая 2) для $\mu_e = 6,5 \div 7 \cdot 10^5$, $\mu_h = 10^4$ см²/в·сек. При построении кривой 2 экспериментальные значения электрического поля усреднялись по трем напряжениям на разных участках образца. Расчетные значения скорости движения возмущения в среднем электрическом поле $E_{ср} \sim 200$ в/см полученные из (2), также удовлетворительно совпадают с экспериментом, описанным в работе [6]. Таким образом, неустойчивости в n-InSb, которые наблюдались в [6, 7], по-видимому, могут быть объяснены движением плазмы, образованной локальной ударной ионизацией в прикатодной области.

Институт физики полупроводников
Сибирское отделение
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
14 февраля 1972 г.

Литература

- [1] M. Glicksman. IBM J. Res. Dev., 13, 626, 1969.
- [2] A.H.Thompson, G.S.Kino. J. Appl. Phys., 41, 3064, 1970.
- [3] R.A.Smith. Semiconductors, Cambridge at the University Press 1959;
Р. Смит. Полупроводники, М., ИИЛ., 1962.
- [4] W.P.Dumke. Phys. Rev., 167, 783, 1968.
- [5] M.Glickman. Phys. Rev., 129, 1572, 1963.
- [6] П.А.Бородовский, С.Д.Лучинин, Р.М.Погреб, И.Ф.Розенцвайг.
Симпозиум по физике плазмы и электрическим неустойчивостям
в твердых телах. Тезисы, Вильнюс, 1971.
- [7] H.Heinrich, E.A.Müller, Solid. Stat. Comm., 9, 627, 1971.