

О ВЛИЯНИИ НЕЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ НА КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ПЬЕЗОПОЛУПРОВОДНИКАХ

Н. П. ИСПИРЯН

В работе рассмотрено влияние слабой нелинейной поляризации на коэффициент усиления ультразвука в пьезополупроводниках.

Показано, что с увеличением напряженности поляризующего поля коэффициент усиления уменьшается, вместе с тем уменьшается и частота максимального усиления.

В связи с большими перспективами применения эффекта усиления ультразвука с дрейфовым потоком электронов вопросы теории электроакустических взаимодействий приобрели большой практический и теоретический интерес.

Однако вопрос о влиянии нелинейной поляризации полупроводниковой среды на конвективную неустойчивость (пространственное нарастание амплитуды колебаний) остается нерассмотренным, хотя, как известно [1—3], типичные полупроводники обладают аномально большой нелинейной поляризуемостью.

Целью настоящей работы является учет влияния нелинейности в поляризации на коэффициент усиления ультразвука. При этом рассматривается область слабой нелинейности, в которой поляризуемость можно представить в виде

$$\chi = \chi_0 + \gamma E_p, \quad (1)$$

или то же самое, что

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + 4\pi\gamma E_p, \quad (2)$$

где

$$\varepsilon_0 = 1 + 4\pi\chi_0.$$

ε_0 и χ_0 — соответственно диэлектрическая проницаемость и поляризуемость пьезополупроводника в полях, при которых еще не возникает нелинейность, E_p — напряженность поляризующего поля.

Основные уравнения задачи следующие:

$$T = cS - eE, \quad (3)$$

$$D = eS + \varepsilon E, \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial D}{\partial x} = -4\pi q n, \quad (6)$$

$$\frac{\partial j}{\partial x} = q \frac{\partial n}{\partial t}, \quad (7)$$

$$j = q(n_0 + n) \mu E + q D_n \frac{\partial n}{\partial x}. \quad (8)$$

Здесь s , e , ϵ , T , S — соответственно тензоры упругих, пьезоэлектрических постоянных, диэлектрической проницаемости, напряжений и деформации; D , E , j — электрическая индукция, напряженность электрического поля и плотность тока; D_n — коэффициент диффузии, q — заряд и μ — подвижность электронов; ρ — плотность материала, n_0 — равновесная концентрация электронов проводимости, а n — отклонение от нее, вызванное звуковой волной. Для простоты индексы у соответствующих тензоров опущены. Пусть

$$\begin{aligned} E &= E_0 + E_1 \exp[-i(\omega t - kx)], \\ D &= D_0 + D_1 \exp[-i(\omega t - kx)], \end{aligned} \quad (9)$$

где индексы 0 и 1 относятся соответственно к величинам при отсутствии и присутствии ультразвуковой волны.

Будем считать, что переменное электрическое поле E_1 , генерированное самой звуковой волной и сопровождающее ее, мало по сравнению с полем, приложенным извне, а неравновесная концентрация электронов n , „созданная“ звуковым возмущением, меньше основной — равновесной концентрации n_0 .

Следовательно, в уравнении (8)

$$nE_1 \ll n_0 E_0 \text{ и } nE_1 \ll n_0 E_1,$$

т. е. можно пренебречь членами, содержащими произведение двух амплитуд. Из уравнений (2)–(8) с учетом этих приближений, уравнений (9) и $S = \frac{\partial u}{\partial x}$, где u — смещение частиц среды (в продольной волне) [4], получим

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c' \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (10)$$

где

$$c' = c \left[1 + \frac{\frac{e^2}{\epsilon_0 c} \left(\delta + i \frac{\omega}{\omega_D} \right)}{\delta \theta + i \left(\theta \frac{\omega}{\omega_D} + \frac{\omega_c}{\omega} \right)} \right], \quad (11)$$

$$\omega_c \equiv \frac{4\pi\sigma}{\epsilon_0}, \quad \omega_D \equiv \frac{v_0^2}{D_n}, \quad (12)$$

$$\delta \equiv 1 - \frac{v_d}{v_0}, \quad \theta \equiv 1 + \frac{4\pi\gamma}{\epsilon_0} E_p.$$

σ — удельная проводимость пьезополупроводника, v_0 — скорость ультразвука, v_d — дрейфовая скорость электронов, γ — коэффициент линейной зависимости поляризуемости от поля.

Коэффициент пространственного нарастания амплитуды волны выражается через комплексную постоянную упругости следующим образом:

$$\alpha = \omega \rho^{1/2} \operatorname{Im} [(c')^{-1/2}].$$

С учетом (11) для α получим

$$\alpha = \omega \left(\frac{\rho}{c} \right)^{1/2} \frac{e^2}{2\varepsilon_0 c} \cdot \frac{\frac{\omega_c}{\partial \theta^2 \omega}}{1 + \frac{\omega_c^2}{\partial^2 \theta^3 \omega^2} \left(1 + \theta \frac{\omega^2}{\omega_c \omega_D} \right)^2}. \quad (13)$$

Коэффициент $|\alpha|$ как функция от частоты при частоте звуковой волны

$$\omega = \left(\frac{\omega_c \omega_D}{\theta} \right)^{1/2} \quad (14)$$

имеет максимум, равный

$$|\alpha|_{\max} = \frac{1}{v_0} \frac{e^2}{2\varepsilon_0 c} \frac{(\omega_c \omega_D)^{1/2}}{4\theta^{3/2}}. \quad (15)$$

Из (14) и (15) видно, что $|\alpha|_{\max}$ уменьшается с увеличением θ , вместе с тем уменьшается и частота максимального усиления.

В заключение, принимая $\gamma \approx 1/3 \cdot 10^8$ см/с^{1/2} [1-3], приведем некоторые приближенные оценки (см. таблицу),

Таблица

$E_p; \frac{v}{\text{см}}$	10^4	10^5	$3 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$	10^6
$\left \frac{\Delta \alpha}{\alpha_0} \right ; \%$	0	5	13,3	24	35

где $\left| \frac{\Delta \alpha}{\alpha_0} \right|$ — относительное изменение максимального усиления, α_0 — значение выражения (15) при $\theta = 1$ (или $E_p \leq 10^4$ в/см).

По-видимому, экспериментально можно обнаружить вышеуказанный эффект нелинейности, освещая пьезополупроводник лазерным пучком с напряженностью поля $E_p \sim 10^5$ в/см.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность своему научному руководителю доктору физико-математических наук В. С. Сардаряну за постановку задачи.

ՊՅԵԶՈԿԻՍԱԼԱՂՈՐԴԻՉՆԵՐՈՒՄ ՈՒՆԻՍԻՏԱՅԻՆԻ ՈՒԺԵՂԱՑՄԱՆ
ԳՈՐԾԱԿՑԻ ՎՐԱ ՈՉ ԴԾԱՅԻՆ ԲԵՎԵՌԱՑՄԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

Ն. Պ. ԻՍՊԻՐՅԱՆ

Աշխատանքում քննարկված է պլեզոկիսաազդորդիչներում ուլտրաձայնի ուժեղացման գործակցի վրա թույլ ոչ դժային բևեռացման ազդեցությունը:

Ցույց է տրված, որ ուլտրաձայնի ուժեղացման գործակիցը փոքրանում է բևեռացնող դաշտի լարվածության մեծացումից, փոքրանում է նաև մաքսիմալ ուժեղացման հաճախականությունը:

EFFECT OF NON-LINEAR POLARIZATION ON ULTRA-SOUND
AMPLIFICATION FACTOR IN PIEZOSEMICONDUCTORS

N. P. ISPIRIAN

The effect of slight nonlinear polarization on ultra-sound oscillation amplification factor in piezosemiconductors is considered.

The growth of the intensity of polarization field is shown to reduce the amplification factor and maximum amplification frequency.