

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

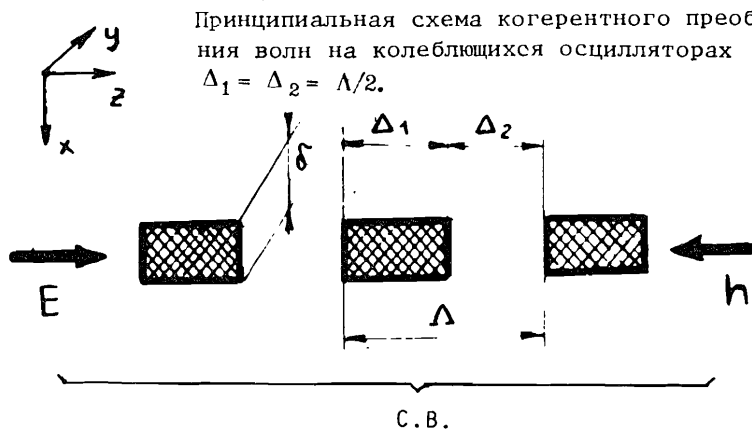
P13-86-516

С.А.Писарева

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ И ГРАВИТАЦИОННОЙ ВОЛН
НА ГИПЕРЗВУКЕ**

1986

В последние годы ведется интенсивный поиск методов эффективного излучения гравитационных волн в лабораторных условиях и способов чувствительного детектирования этих волн /см., например, /1, с. 5//. В связи с этим представляется интересным рассмотреть взаимное преобразование электромагнитной и гравитационной волн в трехволновом параметрическом процессе на гиперзвуковых колебаниях пьезоэлектрических элементов. Примем, что электромагнитная и гравитационная волны E и h распространяются навстречу друг другу через систему вибраторов так, как показано на рисунке, где δ - толщина вибраторов, Λ - период размещения вибраторов.



Эволюция волн описывается уравнениями

$$\frac{\partial^2 E_i}{\partial z^2} - \frac{\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2 E_i}{\partial t^2} = \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 P_i}{\partial t^2}; \quad /1/$$

$$\frac{\partial^2 h_{\mu\nu}}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 h_{\mu\nu}}{\partial t^2} = \frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}, \quad /2/$$

где $T_{\mu\nu}$ - тензор энергии-импульса вещества; G - гравитационная постоянная; ϵ - диэлектрическая проницаемость; P_i - электрическая поляризация среды. Волны представим в виде

$$E_i = \frac{1}{2} E(z, t) e^{i(\omega_2 t - k_2 z)} + \text{к.с.} \quad /3/$$

$$h_{\mu\nu} = \frac{1}{2} h(z, t) e^{i(\omega_1 t + k_1 z)} + \text{к.с.} \quad /4/$$

После подстановки /3/ и /4/ соответственно в /1/ и /2/ и укорочения получим уравнения

$$\left(\frac{\partial E}{\partial z} - \frac{\sqrt{\epsilon}}{c} \frac{\partial E}{\partial t}\right) e^{i(\omega_2 t - k_2 z)} = \frac{i4\pi}{k_2 c^2} \frac{\partial^2 P_i}{\partial t^2}, \quad /5/$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial z} - \frac{1}{c} \frac{\partial h}{\partial t}\right) e^{i(\omega_1 t + k_1 z)} = -\frac{i16\pi G}{k_1 c^4} T_{\mu\nu}. \quad /6/$$

Введем в рассмотрение мощное звуковое поле, колеблющее пьезоэлементы в направлении оси X с частотой Ω и амплитудой деформации S_0 . Соответствующий размер δ выбирается из условия первого резонанса механических колебаний. Звуковая деформация $S_{зв}$ элементов равна

$$S_{зв} = \frac{1}{2} S_0 e^{i\Omega t} + \text{к.с.} \quad /7/$$

В результате взаимодействия типа "деформация-деформация" от гравитационной и звуковой волн появляется электроакустическая волна на комбинационной частоте. Поляризацию P_i в /5/ запишем в виде /2, с. 15/:

$$P_i = \frac{1}{8\pi} \bar{e}_{ijklm} \epsilon_{jk} \epsilon_{lm}, \quad /8/$$

где \bar{e}_{ijklm} - тензор нелинейного пьезоэффекта; $\epsilon_{jk}, \epsilon_{lm}$ - деформации.

Примем, что гравитационная волна задается компонентами $h_{xx} = -h_{yy}$; звуковое поле дает деформацию $\epsilon_{xx} = S_{зв}$. Тогда $\bar{e}_{ijklm} = \bar{e}_{ixxxx}$, индекс i пока не фиксируем, и в дальнейшем индексы опускаем. В силу периодичности системы тензор пьезоэффекта представим в форме

$$\bar{e} = \frac{1}{2} \bar{e} e^{ik_0 z} + \text{к.с.}, \quad /9/$$

где k_0 - волновой вектор решетки - системы вибраторов. Период решетки при этом составит $\Lambda = 2\pi/k_0$.

С учетом принятых условий получим выражение для поляризации:

$$P = \frac{1}{64\pi} \bar{e} S_0 h \exp i[(\omega_1 \pm \Omega)t - (-k_1 \pm k_0)z], \quad /10/$$

Источником гравитационных волн в /2/ служит тензор энергии-импульса на комбинационной частоте $\omega_1 = \omega_2 \pm \Omega$, который принимаем в следующем виде /2, с. 15/:

$$T_{ij} = -\bar{e}_{kijlm} \cdot E_k \epsilon_{lm}, \quad /11/$$

где \bar{e}_{kijlm} - нелинейная константа смешивания полей. Индекс k поля E связан с направлением поляризации и пока не фиксирован.

В рассматриваемом случае

$$T_{xx} = -\frac{1}{8} \bar{e} E S_0 \exp i[(\omega_2 \mp \Omega)t + (-k_2 \pm k_0)z], \quad /12/$$

Из уравнений /5/ и /6/ и выражений /10/ и /12/ следует, что условия волнового синхронизма имеют вид

$$\omega_2 = \omega_1 \pm \Omega; \quad k_2 = -k_1 \pm k_0.$$

В стационарном случае уравнения /5/ и /6/ окончательно примут вид

$$\begin{cases} \frac{dE}{dz} = \frac{i\omega_2 \bar{e} S_0}{16c\sqrt{\epsilon}} h \\ \frac{dh}{dz} = -\frac{2i\pi G \bar{e} S_0}{c^3 \omega_1} E. \end{cases} \quad /13/$$

Система уравнений /13/ имеет решение /3, с. 445/:

$$E(z) = E_0 \frac{e^{\Gamma_1 z} - e^{\Gamma_2 z} m_1 m_2 \exp(\Gamma_1 - \Gamma_2) \ell}{1 - m_1 m_2 \exp(\Gamma_1 - \Gamma_2) \ell} + h_\ell \frac{[e^{\Gamma_2 z} - e^{\Gamma_1 \ell}] m_1 e^{-\Gamma_2 \ell}}{1 - m_1 m_2 \exp(\Gamma_1 - \Gamma_2) \ell}, \quad /14/$$

$$h(z) = E_0 \frac{[e^{\Gamma_1 z} - e^{\Gamma_2 z} \exp(\Gamma_1 - \Gamma_2) \ell] m_2}{1 - m_1 m_2 \exp(\Gamma_1 - \Gamma_2) \ell} + h_\ell \frac{[e^{\Gamma_2 z} - m_1 m_2 e^{\Gamma_1 z}] e^{-\Gamma_2 \ell}}{1 - m_1 m_2 \exp(\Gamma_1 - \Gamma_2) \ell},$$

$$a_{12} = \frac{i\omega_2 \bar{e} S_0}{16c\sqrt{\epsilon}}; \quad a_{21} = -\frac{2i\pi G \bar{e} S_0}{c^3 \omega_1}; \quad /15/$$

$$\Gamma_{1,2} = \mp \sqrt{a_{12} a_{21}}; \quad m_1 = \sqrt{\frac{a_{12}}{a_{21}}}; \quad m_2 = -\sqrt{\frac{a_{21}}{a_{12}}}.$$

Рассмотрим два случая.

1. Преобразование гравитационной волны в электромагнитную, т.е. осуществляется прием гравитационной волны.

Граничные условия:

$$E(z=0) = E_0 = 0, \quad h(z=\ell) = h_\ell.$$

Из /14/ следует величина напряженности поля E_ℓ в электромагнитном сигнале:

$$E_\ell = h_\ell m_1 \frac{1 - e^{(\Gamma_1 - \Gamma_2) \ell}}{1 + e^{(\Gamma_1 - \Gamma_2) \ell}}. \quad /16/$$

2. Преобразование электромагнитной волны в гравитационную, т.е. генерирование гравитационной волны.

Граничные условия:

$$E(z=0) = E_0, \quad h(z=l) = h_l = 0.$$

Величина амплитуды гравитационной волны на выходе излучателя будет равна

$$h_0 = E_0 m_2 \frac{1 - e^{(\Gamma_1 - \Gamma_2)l}}{1 + e^{(\Gamma_1 - \Gamma_2)l}} \quad /17/$$

Произведем оценку амплитуды гравитационной волны h при следующих предельных предположениях: в качестве "волновода" примем пластины ниобата лития; $\bar{\epsilon} \approx 10^7$; $\epsilon \approx 30$; допустимая деформация кристалла $S_0 \approx 10^{-2}$; $G = 6,67 \cdot 10^{-8}$; $c = 3 \cdot 10^{10}$; $E_0 \approx 10^5$; частоты волн ω_1, ω_2 и Ω примем одного порядка $\approx 10^8$; активная длина преобразования волн $l \approx 10 \text{ А} \approx 6 \cdot 10^3$. Все величины даны в системе СГСЭ. При использовании этих данных из формулы /17/ получим амплитуду излучаемой гравитационной волны $h \approx 10^{-32}$, что соответствует потоку

$$t^{oz} = \frac{\omega^2 h^2 c^3}{32\pi G} = 3 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Для оценки пороговой мощности гравитационной волны, регистрируемой данным методом, примем минимально детектируемый электромагнитный сигнал $\approx 10^{-19}$ эрг, т.е. сигнал с напряженностью поля $E_0 \approx 10^{-9}$ СГСЭ. В этом случае из /16/ находим пороговую величину амплитуды гравитационной волны $h \approx 10^{-14}$.

Из полученных предельных оценок видно, что трехволновой нелинейный параметрический процесс на макроосцилляторах может обеспечить сравнительно высокий уровень гравитационного потока. Для приема же гравитационной волны данный метод слабо чувствителен /заметим, однако, что чувствительность можно улучшить, подняв частоту гравитационной волны в оптический диапазон, что следует из структуры коэффициента m_1 /.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сб. "Гравитационные волны", Труды рабочего совещания по созданию излучателя и детектора гравитационных волн. ОИЯИ, P2-85-667, Дубна, 1985.
2. Нелинейные акустоэлектронные устройства и их применение. /Под ред. В.С.Бондаренко/. "Радио и связь", М., 1985.
3. Ахманов С.А. и др. Введение в статистическую радиофизику и оптику. "Наука", М., 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 июля 1986 года.

Писарева С.А.

P13-86-516

Преобразование электромагнитной и гравитационной волн на гиперзвуке

Рассмотрен трехволновой параметрический процесс преобразования электромагнитной и гравитационной волн в СВЧ-диапазоне на колеблющихся с гиперзвуковой частотой макроосцилляторах. Показано, что этим методом можно получить гравитационный поток порядка 10^{-12} эрг·см⁻²·с⁻¹, однако чувствительность приема гравитационной волны данным методом незначительна.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Pisareva S.A.

P13-86-516

Transformation of Electromagnetic and Gravitational Waves on a Hypersonic Wave

The three-wave parametric process of transformation of electromagnetic and gravitational waves in the VHF range on macro-oscillators with hypersonic oscillations is analysed. The technique is shown to allow a gravitational flux of the order of 10^{-12} erg cm⁻²s⁻¹, but reception sensitivity to the gravitational wave is very low in this case.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986