

ОБ ИНВЕРСНОЙ ЗАСЕЛЕННОСТИ И УСИЛЕНИИ ИК ИЗЛУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ В ПОЛЕ МОЩНОЙ ВЧ РАДИОВОЛНЫ

Б.Ф. Гордиец, А.Н. Степанович

Исследована возможность возникновения инверсной заселенности на лазерном переходе с длиной волны 10,6 мкм молекулы CO_2 при воздействии на нижнюю ионосферу мощной ВЧ радиоволны; рассчитан соответствующий коэффициент усиления ИК излучения.

В последнее время в ряде работ исследовалась возможность возникновения инверсной заселенности колебательных уровней и усиления ИК излучения в некоторых природных объектах — верхних атмосферах Венеры и Марса и верхней атмосфере Земли /1—4/. В этих работах было показано, что в слоях атмосфер Венеры и Марса может существовать природный лазерный эффект на переходе 00^01-10^00 молекул CO_2 , обусловленный возбуждением этих молекул солнечным излучением, с коэффициентом усиления $\approx 10^{-9} \text{ см}^{-1}$ /1/. Аналогичный эффект может иметь место и в освещенной Солнцем мезосфере Земли с коэффициентом усиления $\approx 10^{-13} \text{ см}^{-1}$ /2-4/ и ночью в полярных сияниях с коэффициентом усиления в интенсивных сияниях IV балла до 10^{-11} см^{-1} /2, 3/. В работе /5/ была показана возможность существования лазерного эффекта в УФ диапазоне на электронных переходах в молекуле N_2 при ВЧ пробое газа в стратосфере в скрещенных пучках радиоволн.

В данной работе исследуется возможность возникновения инверсной заселенности уровней 00^01-10^00 молекулы CO_2 в нижней ионосфере при распространении через нее вертикально вверх мощной ВЧ радиоволны от точечного источника, расположенного на поверхности Земли.

Механизм возникновения инверсной заселенности следующий. При прохождении ВЧ радиоволны через ионосферу ее электрическое поле $E = E_0 \cos(\omega t)$ может весьма эффективно нагревать ионосферные электроны (до температур $T_e \approx 2000-4000 \text{ К}$). Разогретые электроны теряют свою энергию в основном в столкновениях с молекулами N_2 , причем на возбуждение колебаний N_2 затрачивается значительно большая доля этой энергии, чем на возбуждение электронных уровней. Передача же энергии от колебательно-возбужденных молекул N_2^* к молекулам CO_2 по каналу $\text{N}_2^* + \text{CO}_2(00^00) \rightarrow \text{N}_2 + \text{CO}_2(00^01)$ является основным механизмом, обеспечивающим отток энергии от N_2^* на высотах $< 100 \text{ км}$ и заселение уровня $\text{CO}_2(00^01)$. Это и обуславливает образование инверсной

заселенности на переходе $00^0 1 \rightarrow 10^0 0$ (ибо заселенность уровня $10^0 0$ обычно близка или меньше равновесного значения, соответствующего весьма низкой температуре газа T).

Температура электронов T_e в квазистационарном режиме определяется из нелинейного уравнения, описывающего баланс энергии ионосферных электронов в высокочастотном поле:

$$2 \cdot 10^{15} E_{ef}^2 / \nu_M + Q^{ion} = R. \quad (1)$$

Первый член в левой части (1) описывает нагрев ионосферных электронов ВЧ полем волны, E_{ef} выражено в В/м; частота столкновений ν_M — в c^{-1} , второй член Q^{ion} (град/с) — нагрев за счет передачи энергии от фотоэлектронов и вторичных электронов ионизации; величина R (град/с) в правой части (1) описывает потери энергии электронов в различных упругих и неупругих процессах при столкновении с атмосферными компонентами. Выражения для объемной скорости ионизации Q^{ion} , R и для частоты упругих столкновений электронов с частицами газа ν_M приведены в обзоре /6/.

Действие ВЧ поля радиоволны на ионосферные электроны учитывается введением постоянного "эффективного" электрического поля E_{ef} , которое связано с амплитудой ВЧ поля E_0 соотношением /6, 7/:

$$E_{ef} = E_0 \sqrt{\varphi/2},$$

$$\varphi = \nu_M^2 \left\{ \frac{\cos^2 \beta}{\omega^2 + \nu_M^2} + \frac{\sin^2 \beta}{2[(\omega - \omega_H)^2 + \nu_M^2]} + \frac{\sin^2 \beta}{2[(\omega + \omega_H)^2 + \nu_M^2]} \right\}. \quad (2)$$

Здесь β — угол между векторами напряженностей электрического поля волны и магнитного поля Земли; ω_H (c^{-1}) — электронная гирочастота. Применение метода "эффективного" поля справедливо для частот $\omega > 0,1\nu_M$, что практически всегда выполняется в нижней ионосфере при проведении экспериментов с ВЧ радиоволнами ($\omega > 2$ МГц).

Кроме нагрева важным процессом при взаимодействии ВЧ радиоволны с ионосферными электронами может явиться дополнительная ионизация газа электронами, ускоренными в поле этой волны до энергии, превышающей порог ионизации газа. Следствием этого является возрастание концентрации ионосферных электронов. Величина скорости ионизации полем в зависимости от отношения E/N , где N — концентрация газа, приведена в /6/.

Передача энергии от волны к электронам приводит к затуханию радиоволны с высотой по закону $E_0(z) = E_0(z_0) \exp[-\kappa(z)]$. Коэффициент затухания определяется скоростью потерь энергии волны, которая как раз и идет на нагрев ионосферных электронов. Этот коэффициент равен:

$$\kappa(z) = 7,8 \cdot 10^3 \int_{z_0}^z N_e \frac{\nu_M}{\nu} dz. \quad (3)$$

Здесь высота z выражена в км, ν_M — в с^{-1} ; N_e — концентрация ионосферных электронов в см^{-3} , z_0 (км) — высота, для которой $\kappa \ll 1$. При распространении вертикально вверх радиоволны от точечного источника кроме диссипативного затухания происходит также ее ослабление вследствие удаления от источника, пропорциональное $1/z$. Поэтому окончательное выражение для амплитуды ВЧ поля волны в (2) будет иметь вид:

$$E_0(z) = [E_0(z_0)/(z/z_0)] \exp[-\kappa(z)]. \quad (4)$$

Максимальное значение коэффициента усиления ИК излучения G реализуется в Р-ветви перехода $00^0_1 \rightarrow 10^0_0$ с вращательного уровня $j = \sqrt{T/(2B_e)}$ (B_e — вращательная постоянная в К) и при доплеровском контуре линии равно:

$$G (\text{см}^{-1}) = 7,5 \cdot 10^{-16} \Delta N/T, \quad (5)$$

где $\Delta N = N_{001} - N_{100}$ выражено в см^{-3} , T — в К.

На основе детальной модели верхней атмосферы Земли, подробно описанной в /8, 9/, и с использованием выражений (1)—(5) нами был численно рассчитан коэффициент усиления ИК излучения в полосе 10,6 мкм молекулы CO_2 на переходе $00^0_1-10^0_0$ при распространении вертикально вверх мощной ВЧ радиоволны с частотой $f = \omega/2\pi = 4$ МГц от точечного источника,

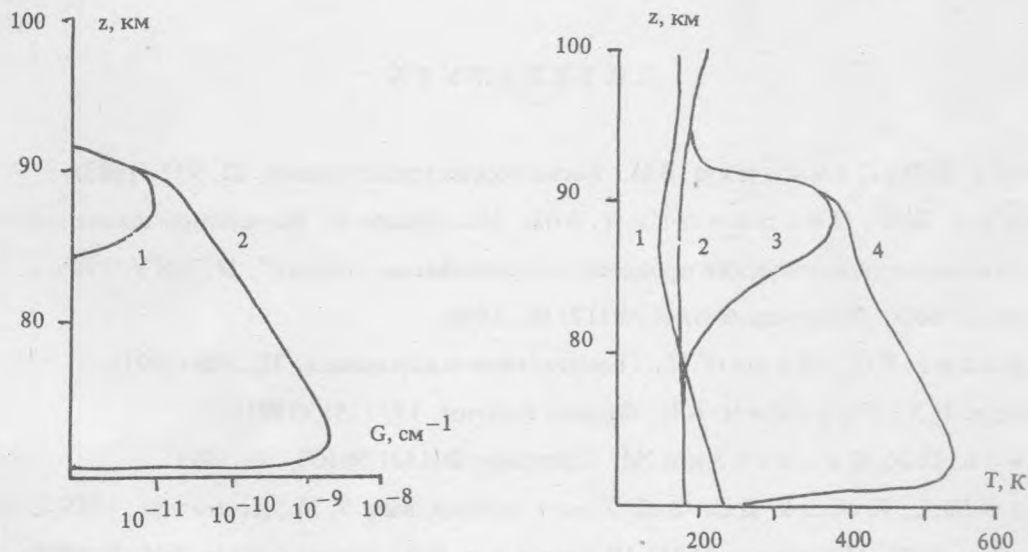


Рис. 1. Высотный ход коэффициента усиления G при $E_0 = 4$ В/м (1), $E_0 = 40$ В/м (2).

Рис. 2. Высотный ход колебательных температур нижнего T_{100} (1) и верхнего T_{001} (2-4) лазерных уровней при $E_0 = 0$ (2), $E_0 = 4$ В/м (3), $E_0 = 40$ В/м (4).

расположенного на поверхности Земли. Расчет был выполнен для ночных условий для типичного слабого полярного сияния (поток энергии высыпавшихся из магнитосферы быстрых электронов $3 \text{ эрг/см}^2\text{с}$ с максвелловским распределением по энергии и с характеристической энергией в этом распределении 3 кэВ).

На рис. 1, 2 представлен высотный ход коэффициента усиления G и колебательных температур T_{001} и T_{100} верхнего и нижнего лазерных уровней для двух значений напряженности электрического поля в волне на высоте $z_0 = 70 \text{ км}$: $E_0 = 4 \text{ В/м}$ и $E_0 = 40 \text{ В/м}$. Расчет показывает, что в выбранных для анализа условиях в отсутствие радиоволны инверсной заселенности нет. В случае поля со значением $E_0 = 4 \text{ В/м}$ фактически единственным источником плазменных электронов является ионизация газа высыпавшимися быстрыми электронами, что определяет высоту возникновения инверсной заселенности $\approx 90 \text{ км}$. В случае же поля со значением $E_0 = 40 \text{ В/м}$ концентрация электронов определяется уже ионизацией газа электронами, разогретыми полем ВЧ волны. Из-за роста концентрации электронов это приводит к увеличению коэффициента поглощения (см. (3)) и уменьшению высоты возникновения инверсной заселенности приблизительно до 70 км . Максимальный коэффициент усиления на одном проходе в горизонтальном направлении составляет около $2 \cdot 10^{-3}\%$ для поля с $E_0 = 4 \text{ В/м}$ и $0,5\%$ для поля с $E_0 = 40 \text{ В/м}$. Последняя величина вполне достаточна для экспериментального обнаружения эффекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гордиец Б.Ф., Панченко В.И. Космические исследования, **21**, 929 (1983).
2. Гордиец Б.Ф., Степанович А.Н. Материалы III Всесоюзной школы-конференции "Кинетические и газодинамические процессы в неравновесных средах", М., МГУ, 1986, с. 142.
3. Гордиец Б.Ф. Препринт ФИАН №117, М., 1990.
4. Мануйлова Р.О., Швед Г.М. Геомагнетизм и аэрономия, **31**, 506 (1991).
5. Борисов Н.Д., Гуревич А.В. Физика плазмы, **17**, 1131 (1991).
6. Гордиец Б.Ф., Капителли М. Препринт ФИАН №108, М., 1991.
7. Иванов Ю.А., Полак Л.С. В сб. Химия плазмы, вып. 7, М., Атомиздат, 1975, с. 161.
8. Гордиец Б.Ф., Марков М.Н., Шелепин Л.А. Труды ФИАН, **105**, 7 (1978).

Поступила в редакцию 3 июня 1992 г.