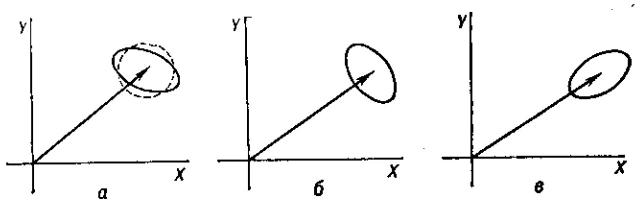

Рис. 1. Схематичное представление сжатых состояний электромагнитного поля на фазовой плоскости: *а* — произвольная ориентация эллипса сжатия; *б* — подавлены амплитудные флуктуации; *в* — подавлены фазовые флуктуации.

ного состояния, эллипсами — области неопределённости С. с. При соответствующей ориентации эллипса сжатия относительно регулярной составляющей поля возможно подавление как амплитудных (рис. 1,*б*), так и фазовых (рис. 1,*в*) флуктуаций.

В *квантовой оптике* напряжённость одномодового электрич. поля описывается оператором

$$\hat{E}=C[\hat{X}\sin(\omega t-kz)+\hat{Y}\cos(\omega t-kz)],$$

где $\hat{X}$ и $\hat{Y}$ — операторы квадратур:

$$\hat{X}=(a+a^{+})/2,\quad \hat{Y}=(a-a^{+})/i2,$$

ω — частота, k — волновое число, z — направление распространения излучения, $C=\mathrm{const}$, a и a^{+} — операторы уничтожения и рождения фотона. Операторы квадратур удовлетворяют коммутац. соотношению $[\hat{X},\hat{Y}]=i/2$, а их дисперсии $\sigma^2_X=\langle\Delta\hat{X}^2\rangle$, $\sigma^2_Y=\langle\Delta\hat{Y}^2\rangle$ — соотношению неопределённостей

$$\sigma^2_X\sigma^2_Y\geqslant 1/16,$$

$\Delta\hat{X}=\hat{X}-\langle\hat{X}\rangle$, $\langle\hat{X}\rangle=\langle\psi|\hat{X}|\psi\rangle$, $|\psi\rangle$ — вектор состояния поля, $\langle\ldots\rangle$ — квантовомеханич. усреднение. В когерентном и вакуумном состояниях $\sigma^2_X=\sigma^2_Y={}^1/_4$. В квантовом С. с. флуктуации одной из квадратур, напр., $\sigma^2_X<{}^1/_4$, тогда как $\sigma^2_Y>{}^1/_4$ или наоборот.

В случае классич. флуктуаций операторы a, a^{+} заменяются комплексными амплитудами A, A^*, при этом квадратуры

$$X=(A+A^*)/2,\quad Y=(A-A^*)/i2.$$

При классич. сжатии $\sigma^2_X\neq\sigma^2_Y$.

Поля в С. с. являются периодически нестационарными [1], в чём легко убедиться, используя классич. описание. Полагая квадратуры некоррелированными, для ср. интенсивности поля имеем:

$$\langle E^2\rangle=\left[\sigma^2_X+\sigma^2_Y+\left(\sigma^2_Y-\sigma^2_X\right)\cos 2(\omega t-kz)\right]/2.$$

Методы получения сжатых состояний основываются на нелинейных радиофиз. и оптич. процессах. В оптике С. с. могут возникать в трёх- и четырёхчастотных параметрич. взаимодействиях (см. *Взаимодействие световых волн*), при генерации высших гармоник, в эффектах самовоздействия, комбинац. рассеянии, многофотонных процессах и т. п. Возможно также непосредств. создание высокостабильных лазерных источников излучения, в к-рых подавление квантовых флуктуаций осуществляется либо депрессией шумов накачки, либо введением отрицат. *обратной связи*.

Преобразование вакуумного или когерентного состояния, к-рому соответствуют операторы a и a^{+}, в сжатое (соответственно операторы b и b^{+}) описывается операторным ур-нием в представлении Гейзенберга:

$$b=\mu a+\nu a^{+},\quad b^{+}=\mu^*a^{+}+\nu^*a,\qquad(1)$$

где μ и ν — постоянные, удовлетворяющие соотношению $|\mu|^2-|\nu|^2=1$. Тогда дисперсии флуктуаций квадратурных компонент

$$\sigma^2_X=|\mu-\nu|^2/4,\quad \sigma^2_Y=|\mu+\nu|^2/4.\qquad(2)$$

Преобразование вакуумного состояния в сжатое иначе можно записать как [2]:

$$|\alpha,\xi\rangle=D(\alpha)S(\xi)|0\rangle,\qquad(3)$$

где $|0\rangle$ — вектор вакуумного состояния, а $D(\alpha)$ и $S(\xi)$ — операторы смещения и сжатия:

$$D(\alpha)=\exp(\alpha a^{+}-\alpha^*a),\qquad(4)$$

$$S(\xi)=\exp\left(\frac{1}{2}\xi(a^{+})^2-\frac{1}{2}\xi^*a^2\right),$$

α и ξ — в общем случае комплексные числа.

Состояние $|0_s\rangle=S(\xi)|0\rangle$ принято называть вакуумным С. с. ($\alpha=0$).

С. с. возникает, напр., при вырожденном параметрич. взаимодействии. В поле интенсивной классич. накачки параметрич. усиление слабого сигнала описывается ур-нием для операторов в представлении Гейзенберга:

$$da/dz=\beta a^{+},\qquad(5)$$

где β — комплексный коэф., зависящий от нелинейных свойств среды и амплитуды накачки. Решение (5) имеет вид:

$$a(z)=a_0\,\mathrm{ch}\,\Gamma z+e^{i\theta}a_0^{+}\,\mathrm{sh}\,\Gamma z,\qquad(6)$$

где $\Gamma=|\beta|$, $\theta=\arg\beta$, а операторы a_0 и a_0^{+} — параметры на входе нелинейной среды.

Операторы квадратур преобразуются следующим образом:

$$\hat{X}(z)=(\mathrm{ch}\Gamma z+\cos\theta\,\mathrm{sh}\Gamma z)\hat{X}_0+(\sin\theta\,\mathrm{sh}\Gamma z)\hat{Y}_0,$$
$$\hat{Y}(z)=(\mathrm{ch}\Gamma z-\cos\theta\,\mathrm{sh}\Gamma z)\hat{Y}_0+(\sin\theta\,\mathrm{sh}\Gamma z)\hat{X}_0.\qquad(7)$$

Аналогичные соотношения получаются и при полностью классическом описании параметрич. усиления (с заменой операторов комплексными амплитудами). Согласно (7), дисперсии квадратур при $\theta=0$

$$\sigma^2_X(z)=\sigma^2_X(0)e^{2\Gamma z},\quad \sigma^2_Y(z)=\sigma^2_Y(0)e^{-2\Gamma z},\qquad(8а)$$

а при $\theta=\pi$

$$\sigma^2_X(z)=\sigma^2_X(0)e^{-2\Gamma z},\quad \sigma^2_Y(z)=\sigma^2_Y(0)e^{2\Gamma z}.\qquad(8б)$$

Поведение квадратур, т. о., существенно зависит от фазы накачки θ. Фазовая селективность рассматриваемого параметрич. процесса — важнейшая его особенность, исследованная в радиодиапазоне в нач. 1960-х гг. [4]. Тогда же были продемонстрированы возможности управления статистич. характеристиками эл.-магн. полей, снижения уровня фазовых флуктуаций, улучшения характеристик систем выделения сигнала из шума. Действительно, при соответствующей ориентации эллипса сжатия на фазовой плоскости, регулируемой выбором фазы накачки, подавление флуктуаций квадратуры приводит к снижению фазовых флуктуаций. Это просто показать на примере классич. С. с. Пусть напряжённость поля (эллипс ориентирован вдоль оси X)

$$E=(\langle X\rangle+\Delta X)\sin(\omega t-kz)+\Delta Y\cos(\omega t-kz)\qquad(9)$$

или

$$E=\rho\cos\varphi,$$