

сравнению с синхротронным излучением оно обладает более высокими интенсивностью, направленностью, степенью монохроматичности и поляризации.

Обычно длина периода траектории частицы в ондуляторе  $\lambda_0 \approx 1$  см, т. к. она должна быть больше его апертуры, определяемой поперечными размерами пучка ( $\approx 1$  мм). Более жесткое излучение (с энергией квантов  $h\omega_{\text{макс}} \approx \epsilon$ ) при меньшей эффективности генерации испускается в ондуляторах с  $\lambda_0 \ll 1$  см. Такими ондуляторами могут служить, напр., эл.-магн. волны (обратный Комптона эффект) и кристаллы. Кристаллы устанавливаются на краю рабочей области синхротронов, на выходе линейных ускорителей электронов, а также в электронных каналах протонных синхротронов. Поляризов. пучки фотонов, испускаемые электронами в поле поляризованной эл.-магн. волны или в кристалле (когерентное тормозное излучение, каналированное излучение), используются в ядерной физике и физике высоких энергий.

**Спонтанное когерентное О. и.** В источниках такого излучения используют пучок частиц, предварительно сгруппированный (сбанджированный) в сгустки длиной  $l \lesssim \lambda_n = 2\pi c/\omega_n$ , находящиеся друг от друга на расстоянии  $\lambda_B$ , равном или кратном  $\lambda_n$ . Их интенсивность

$$I_{\text{ког}} = N_1 S I_{\text{нр}},$$

где  $N_1 = i\lambda_B/\epsilon c$  — число частиц в одном сгустке пучка,  $S \lesssim 3$  — интегральный фактор когерентности излучения, определяющийся размерами, угл. и энергетич. разбросом пучка частиц, степенью его группировки, величиной нелинейности поля ондулятора. Осн. часть интенсивности сосредоточена в диапазоне частот и углов

$$\Delta\omega/\omega \lesssim \min(1/nK, 1/M),$$

$$\Delta\psi_{\text{ког}} \lesssim \min(1/\gamma_n \sqrt{nK}, \lambda_n/r_n),$$

где  $M$  — число сгустков пучка,  $r_n$  — поперечные размеры пучка.

Частицы в ондуляторе можно использовать в качестве активной среды лазеров. В источниках спонтанно когерентного О. и. плотность излучающих частиц — осн. параметр активной среды — в общем случае промодулирована в пространстве координат и импульсов, поэтому такие источники наз. также параметрич. лазерами на свободных электронах (ЛСЭ). Фазы эл.-магн. волн, испускаемых частицами пучка в источниках спонтанного когерентного О. и., скоррелированы между собой, а интенсивность  $\sim i^2$ , поэтому их называют также ЛСЭ на сверхизлучении.

Совр. техника группирования пучков позволяет осуществлять генерацию когерентного О. и. с  $\lambda \approx 1$  нм. С применением резонаторов можно увеличить интенсивность источников спонтанного когерентного О. и. в  $Q$  раз, где  $Q$  — добротность резонатора. Источники спонтанного когерентного О. и. с хорошо сгруппиров. пучками частиц позволяют получить предельно возможные характеристики излучения.

**Индукцированное О. и.** В источниках такого излучения используют однородные по плотности пучки частиц. В ондуляторе вместе с пучком подаётся внеш. эл.-магн. волна. Частицы однородного пучка равновероятно попадают как в тормозящие, так и в ускоряющие фазы волны. Изменение энергии частиц, находящихся в противофазах, равны по величине, но противоположны по знаку, поэтому частицы начинают двигаться с разл. продольными скоростями и группируются в сгустки. Если нач. энергия частиц пучка выше нек-рой равновесной энергии, то они группируются в тормозящих фазах волны (поперечная составляющая вектора скорости электрона, определяемая в основном полем ондулятора, направлена под острым углом к вектору напряжённости электрич. поля волны), отдаёт ей свою кинетич. энергию и поэтому усиливает её.

Интенсивность эл.-магн. излучения, выходящего из источника индуциров. О. и., пропорц. величине

$$|E_B + E_{\text{п}}|^2 = |E_B|^2 + 2|E_B E_{\text{п}}| + |E_{\text{п}}|^2,$$

где  $E_B$  — напряжённость электрич. поля усиливаемой волны,  $E_{\text{п}}$  — напряжённость электрич. поля, создаваемого сгруппировавшимися в сгусток частицами пучка. Вклад индуцир. О. и. пропорционален  $2|E_B E_{\text{п}}|$ . О. и. распространяется в той же области пространства и обладает теми же характеристиками, что и усиливаемая волна. Член  $|E_{\text{п}}|^2$  соответствует спонтанному когерентному О. и. источника, и при  $|E_{\text{п}}|^2 \gg 2|E_B E_{\text{п}}| \gg |E_B|^2$  (режим больших коэф. усиления) генерируется в основном спонтанное когерентное О. и. Роль внеш. волны в этом случае сводится к «затравке», группирующей пучок. Большие коэф. усиления и большие эффективности излучения источников, осуществляемые, как правило, с использованием в них ондуляторов с переменными параметрами (период траектории частиц, амплитуда магн. поля), характерны для ондуляторных усилителей (лазерных усилителей на свободных электронах, основанных на ондуляторах). Режим генерации индуцир. О. и. достигается введением в источник О. и. резонаторов, зеркал и др. элементов, позволяющих осуществить обратную связь между излучением и излучающей системой.

Источники спонтанного некогерентного О. и. могут испускать излучение в широком диапазоне частот — от ИК- до гамма-излучения. Такое О. и. может обладать достаточно высокими монохроматичностью ( $\Delta\omega/\omega \approx 1/K \approx 10^{-2} \div 10^{-3}$ ) и длиной когерентности [ $l_{\text{ког}} = c\Delta t = K\lambda_1 \approx (10^2 \div 10^3)\lambda_1$ ], степенью поляризации  $\sim 100\%$ , вид к-рой можно изменить в ходе эксперимента. Излучение можно оперативно перестраивать по частоте в широких пределах (в неск. раз). Мощность таких источников растёт с уменьшением  $\lambda$  и достигает значений  $P \sim 1$  кВт (при  $\lambda \sim 0,1$  нм). Параметр вырождения (плотность числа фотонов в одной моде) источников спонтанного некогерентного О. и. в оптич. диапазоне длин волн может на 3–4 порядка превышать параметр вырождения тепловых источников и достигать значений  $\approx 1$  и с уменьшением длины волны падает по степенному, а не по экспоненциальному (как для тепловых источников) закону.

Источники спонтанного некогерентного О. и. на основе накопителей получили широкое распространение. На накопителе можно устанавливать неск. ондуляторов, а на каждом канале О. и. — неск. установок для разл. исследований. Источники спонтанного когерентного и индуцированного О. и. для ИК- и оптич. диапазонов длин волн также базируются как на существующих электронных ускорителях, так и на специализиров. ускорителях и накопителях для таких источников. Теория, эксперим. исследования и первый опыт эксплуатации показали, что ондуляторные источники расширяют область использования когерентного излучения.

Идея генерации спонтанного О. и. впервые была высказана и обоснована В. Л. Гинзбургом в 1947. Теоретически было показано, что О. и. должно обладать рядом преимуществ перед синхротронным излучением: монохроматичностью в заданном направлении, более высокой спектральной плотностью потока энергии излучения. Была предложена схема источника, в к-ром частицы пучка проходят многократно через ондулятор, двигаясь по замкнутой траектории в магн. системах типа синхротронов с прямолинейными промежутками. Дальнейшее развитие теория О. и. получила в работах Г. Моца (H. Motz) (1951–53). Им на основе линейных ускорителей были построены первые источники спонтанного когерентного О. и., исследованы свойства О. и. этих источников. Визуально наблюдалась цветная радужная картина О. и. в оптич. диапазоне, согласующаяся с теоретически полученной зависимостью частоты от угла  $\theta$ . Уникальные возможности