

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОН-ИОННОГО КОЛЬЦА КУТИ-20
И ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Г.В.Долбилов, А.Н.Мальцев, В.Н.Саранцев, А.Н.Сумбаев, С.И.Тютюнников,
В.Н.Шаляпин

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Синхротронное излучение (СИ) релятивистских электронов в циклических ускорителях и накопителях является источником в широкой области спектра от видимого диапазона до рентгеновского излучения. Это излучение с каждым годом находит все более широкое применение в исследованиях физики твердого тела, атомной физики, рентгеновской литографии /1/. Такой повышенный интерес к СИ стимулирует поиск технических решений в создании мощных источников излучения, более компактных, дешевых, чем большие накопители. Так, в работе /2/ было показано, что в электронных кольцах, которые используются для коллективных методов ускорения с энергией $E_e = 70$ МэВ и $R = 2$ см, могут быть получены большие пиковые мощности вплоть до длин волн $\lambda \approx 1000$ Å. Исходя из этого, мы проанализировали характеристики СИ электрон-ионного кольца коллективного ускорителя тяжелых ионов КУТИ-20 с целью найти возможное применение. Одной из основных привлекающих особенностей электронных колец является большое число электронов $N_e \approx 10^{13}$ /3/ по сравнению с известным источником СИ на кольцах малого размера, ускоритель "Тролль" /4/. Коллективный ускоритель тяжелых ионов КУТИ-20 имеет следующие параметры: $E_e = 15+25$ МэВ, $a_x = a_z = 2$ мм, $R = 4+3$ см, $N_e = 10^{13}$. Для такого электронного кольца спектр СИ лежит в ИК-области. Для этой спектральной области, особенно для дальнего ИК-диапазона, отсутствуют мощные излучатели, а из имеющихся можно перечислить:

1. Источник абсолютно-черного тела АЧТ при $T = 1200^{\circ}\text{K}$, для которого $P = 10^{-5}$ $\frac{\text{Вт}}{\text{мкм}^2 \text{ см}^2}$ для $\lambda = 100$ мкм.
2. Ртутная лампа при сверхвысоком давлении, у которой $P = 10^{-8}$ Вт в интервале длин волн $4\lambda/\lambda = 1/10$ для $\lambda = 100$ мкм /5/.
3. Субмиллиметровые лазеры, которые, однако, дают дискретные линии, без возможности перестройки от 40 до 1800 мкм в импульсной мощности до 10 кВт. Отсутствие перестройки по длинам волн является их главным недостатком /6/.

Впервые в работе /7/ был проведен анализ использования СИ в дальней ИК-области, и показано, что поскольку его спектральная плотность спадает как λ^{-1} , а плотность излучения АЧТ как λ^{-3} , то в дальней области ИК мощность СИ будет превосходить АЧТ. Расчеты для накопителя "Tantalus" с параметрами: $R = 0,65$ м, $E_e = 240$ МэВ, $I_e = 50$ мА, показывают, что уровень СИ на $\lambda = 240$ мкм будет превосходить АЧТ более чем на два порядка. Были выполнены измерения СИ в ИК-диапазоне на накопителе АСО $E_e = 540$ МэВ, $R = 1,1$ м, $I_e = 70$ мА на длине волны $\lambda = 2,5$ мкм, которые дают значение мощности излучения $P = 10^{-7}$ Вт в $4\Omega = 10^{-4}$ /8/, где 4Ω - телесный угол регистрации излучения.

Как было сказано выше, в электронном кольце КУТИ-20 число электронов $N_e \approx 10^{13}$. На рис. I приведены расчетные значения импульсной спектральной плотности СИ и излучения АЧТ с температурой 1200°K . Из графика видно, что для $N_e = 10^{13}$ мощность СИ на $\lambda = 100$ мкм составляет $P_{SI} = 0,5 \frac{\text{Вт}}{\text{мкм}^2 \text{ см}^2}$,

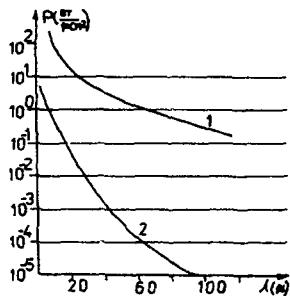


Рис. 1. Спектральное распределение плотности СИ и излучения АЧТ. 1 - СИ $\gamma = 50, R = 4 \text{ см}, N_e = 10^{13}$; 2 - АЧТ $T = 1200^\circ\text{C}$.

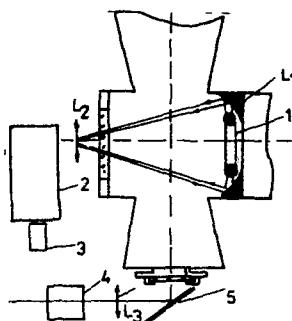


Рис. 2. Геометрия вывода СИ из камеры ускорителя. 1 - электронное кольцо, 2 - монокроматор ИК, 3 - детектор ИК, 4 - диссектор, 5 - зеркало, L_1, L_2, L_3 - линзы.

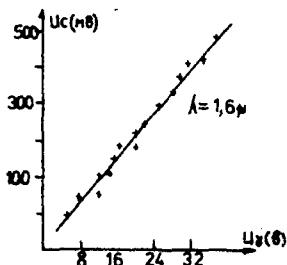


Рис. 3. Зависимость суммарной мощности СИ на $\lambda = 1,6 \mu\text{мкм}$ от относительной интенсивности электронов U_d , измеренной в электронном кольце КУТИ по γ - излучению.

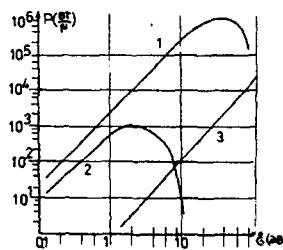


Рис. 4. Спектральное распределение СИ: 1 - электронное кольцо $\gamma = 100, R = 2 \text{ см}, N_e = 10^{13}$ 2 - КУТИ-20 $\gamma = 50, R = 4 \text{ см}, N_e = 10^{13}$, 3 - накопитель "Сибирь" $\gamma = 840, R = 100 \text{ см}, I_e = 0,2 \text{ А}$.

$P_{\text{SI}} = 10^{-5} \frac{\text{ст}}{\text{см}^2 \text{мкм}}$. Расчетное значение спектральной плотности излучения для накопителя АСО /8/ для $\lambda = 100 \mu\text{мкм}$ составляет $P_{\text{SI}} = 10^{-6} \frac{\text{ст}}{\mu\text{мкм}}$. Расчетное значение мощности СИ для $\lambda = 100 \mu\text{мкм}$ для накопителя DORIS: $E_e = 4 \text{ ГэВ}, R = 12 \text{ м}, I_e = 0,3 \text{ А}; P_{\text{SI}} = 10^{-4} \frac{\text{ст}}{\mu\text{мкм}}$. В электронном кольце КУТИ-20 удается создать выводной канал СИ с геометрической эффективностью, близкой к единице.

На рис. 2 показана геометрия вывода СИ из камеры адгезатора, где происходит формирование электронных колец. Для работы на лучке СИ от электронных колец необходимо иметь два независимых канала: 1 - канал для измерения интенсивности электронов в кольце в каждом цикле, энергии электронов. Для этого излучение выводится через окно в медианной плоскости ускорителя; 2 - канал излучения позволяет геометрически с помощью фокусирующей оптики собрать практически все излучение электронного кольца. Для реализации этого режима электронное кольцо выводится в место установки фокусирующего зеркала L_1 . Таким образом, обеспечивается геометрия использования полного СИ от кольца в ИК-области ~ 50% при непрерывном мониторировании интенсивности электронов N_e , энергии E , размеров сечения кольца A_R, A_Z , в видимой области спектра или в ближнем ИК. Измерения, проведенные на КУТИ-20, показали, что средняя энергия электронов от цикла к циклу меняется не более чем на 1%. Относительную точность мониторинга

рования по числу электронов можно обеспечить не хуже 5% (по измерению γ -излучения от высадки электронов), по абсолютной мощности СИ не хуже 10%, что связано с абсолютным измерением числа электронов (рис.3). Длительность импульса СИ в КУТИ-20 может изменяться от 100+200 мкс в случае полного сбора излучения и от 2 до 20 мс для режима удержания кольца в медианной плоскости. Режим с удержанием $T = 20\text{мс}$ экспериментально реализован на установке типа КУТИ /9/. Если обеспечить режим длительного удержания кольца вблизи отражающего ИК-излучения зеркала, то можно значительную часть энергии пучка перевести в СИ. Для 5% потерь энергии на СИ при полной энергии кольца $W = 40 \text{Дж}$ в ИК-области будут излучены 2 Дж. На ускорителе КУТИ-20 были проведены измерения спектра СИ в ближней ИК-области с помощью монокроматора ИДР-2 в интервале $0,7 \div 2,5 \text{ мкм}$. Разрешение прибора $\lambda_{\Delta\lambda} = 150$.

В таблице приводятся данные измерений на длине волны 2,5 мкм для КУТИ-20 и данные для накопителя АСО /9/.

Таблица

Тип ускорителя	$P_{\text{СИ}} (\text{Бт})$ $\lambda = 2,5 \text{ мкм}$	Примечание
Электронное кольцо КУТИ-20	0,06	Импульсный режим $\frac{4\lambda}{\lambda} = 6,6 \cdot 10^{-3}$
$\gamma = 40; R = 3 \text{ см}$ $N_e \approx (2+3) \cdot 10^{12}$		$\Delta\Omega = 3 \cdot 10^{-3}$
АСО	10^{-7}	$\frac{4\lambda}{\lambda} = 10^{-2}$
$R = 1,1 \text{ м}$ $E_e = 540 \text{ МэВ}$ $I_e = 70 \text{ мА}$		$\Delta\Omega = 10^{-4}$ непрерывный режим

Как видно из таблицы, экспериментально измеренная мощность СИ для электронного кольца на пять порядков больше, чем для накопителя АСО; соответственно и на длинных волнах мощность излучения электронного кольца будет гораздо больше.

Область использования ИК-излучения длинноволнового диапазона чрезвычайно широка: 1 - выполнение работ, связанных с калибровкой детекторов ИК-излучения, вторичных источников; 2 - материаловедческие работы по измерению характеристик материалов в ИК-области: коэффициентов пропускания, отражения; 3 - работы, связанные с исследованием структуры полупроводниковых материалов, изучением процессов фотопроводимости.

Электронные кольца коллектичного ускорителя могут быть также эффективным источником излучения в области вакуумного ультрафиолета /2/. Для этого необходимо иметь значение энергии электронов в кольце $E_e \approx 50 \text{ МэВ}$.

На рис.4 показано расчетное значение спектральной плотности излучения электронного кольца с разными параметрами и специализированного накопителя "Сибирь". Видно, что в области длин волн до $\lambda = 1000 \text{ Å}$ мощность СИ электронного кольца превосходит накопитель. Для некоторых задач метрологии мощности СИ электронного кольца с $E = 25 \text{ МэВ}$ уже достаточно.

Работы могут быть проведены на длине волны излучения $\lambda = 2000 \text{ Å}$. При разработке для целей импульсной метрологии источник излучения должен давать сравнительно большое поле излучения. Для этой цели синхротрон "Тролль" работает в

режиме больших сгустков с увеличенным угловым разбросом электронов /4/. В электрон-ионном кольце, как показали эксперименты, можно регулировать ширину углового распределения изменением величины накопленного ионного заряда.

Литература

1. Г.П.Кулипанов, А.П.Скрипинский. ЖП, т.122, в.3, 1977, с.371-403.
2. С.Аненский и др. ЖТФ, 1985, т.55, вып. I, с.212-214.
3. В.Н.Саранцев, З.А.Перельштейн. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. М.: Атомиздат, 1979.
4. С.П.Беликанов и др. Атомн. энергия, т.41, № 2, 1976, с.113-117.
5. Техника спектроскопии в дальней ИК . субмиллиметровой области. Сб. статей под ред. Т.И.Лившица, М.: Мир, 1970.
6. В.Н.Курзин. Субмиллиметровая спектроскопия коллективных и связанных состояний носителей тока в полупроводниках. М.: Наука, 1985.
7. Stevenson R., Ellis E., Bartlet G.-Appl.Optic.12,1973,p.2884.
8. Meyer P., Lagarde P. -J.Physique 37, 1976, p.1387.
9. И.В.Кузнецов и др. Краткие сообщения ОИЯИ, № 16-86, дубна, 1986, с.33.