

ГИБКИЙ АЛГОРИТМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛ Я РАБОТЫ С ПРОГРАММНЫМ ПАКЕТОМ REDSTORM2

Ю. С. Цыганов¹

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассмотрен новый алгоритм реального времени для пакета программ C++ REDSTORM2 для радикального подавления фона в реакциях полного слияния на новом циклотроне ЛЯР ОИЯИ — ДЦ-280. В отличие от ранее примененных подходов на установке «Дубненский газонаполненный сепаратор ядер отдачи» данный алгоритм предполагает некоторую гибкость при выполнении программы набора данных. А именно: экспериментатором задается не фиксированный интервал времени между имплантацией нуклида в кремниевый детектор и его α -распадом, а допустимая величина относительных потерь реального времени облучения мишени. Представлена блок-схема выполнения алгоритма, и рассмотрены его возможные ответвления. Также рассмотрены краевые эффекты и их роль при сборе неравновесного заряда со стороны p - n -перехода DSSSD детектора фокальной плоскости сепаратора ядер отдачи.

New real-time C++ algorithm for DC-280 cyclotron is considered. In contrast to the former one for applying at the Dubna Gas-Filled Recoil Separator it is designed as more flexible when data taking process takes place. An experimentalist deals with variable time interval between implanted recoil signal and α -particle one except of fixed time interval. A relative irradiation loss time value is considered as an optimizing parameter. The flow-chart of the process is under consideration. Mathematical model of non-equilibrium charge division between two p - n junction side neighbor strips is presented in brief too.

PACS: 07.05.Kf; 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Все новые изотопы сверхтяжелых элементов $Z = 113$ – 118 (Nh, Fl, Mc, Lv, Ts, Og) были получены на установке «Дубненский газонаполненный сепаратор ядер отдачи» в реакциях полного слияния с ионами ^{48}Ca и актинидными мишенями. Успех был достигнут с применением ряда методик, алгоритмов, подходов, обладающих рекордными характеристиками в своей области.

Одним из таких радикальных методов является метод активных корреляций [1–7], позволяющий детектировать распады имплантированных сверхтяжелых ядер в практически бесфоновом режиме. Суть метода — мгновенное (~ 100 мкс) отключение пучка циклотрона при детектировании распада типа ядро отдачи – альфа-распад (ER- α) в реальном масштабе времени.

¹E-mail: tyra@jinr.ru

1. О КРАЕВЫХ ЭФФЕКТАХ

В работах [3, 5] показано, что эффект деления заряда между двумя соседними стрипами со стороны $p-n$ -перехода DSSSD детектора может достигать существенной величины: 10–17% от общего количества регистрируемых событий. Разумеется, это означает, что при работе с любым алгоритмом реального времени для поиска коррелированных звеньев типа ER- α или ER- $\alpha-\alpha$ этот эффект должен приниматься во внимание, чтобы не допустить пропуска событий-кандидатов на многозвенный α -распад. В работе [7] была предложена математическая модель данного процесса на основе системы двух дифференциальных уравнений, представленных ниже, и эквивалентной схемы процесса, показанной на рис. 1. Существенным моментом модели процесса сбора неравновесного заряда является то, что выражение для неравновесного тока регистрируемого заряда (источник тока на рис. 1) рассматривается с учетом модели Сейбта и др. [6] для деструкции изначального неравновесного трека электронно-дырочной плазмы в кремниевом детекторе.

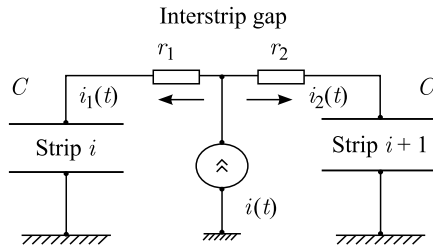


Рис. 1. Эквивалентная схема процесса деления заряда. Источник тока $i(t)$ соответствует попаданию заряженной частицы в ОПЗ детектора [7]

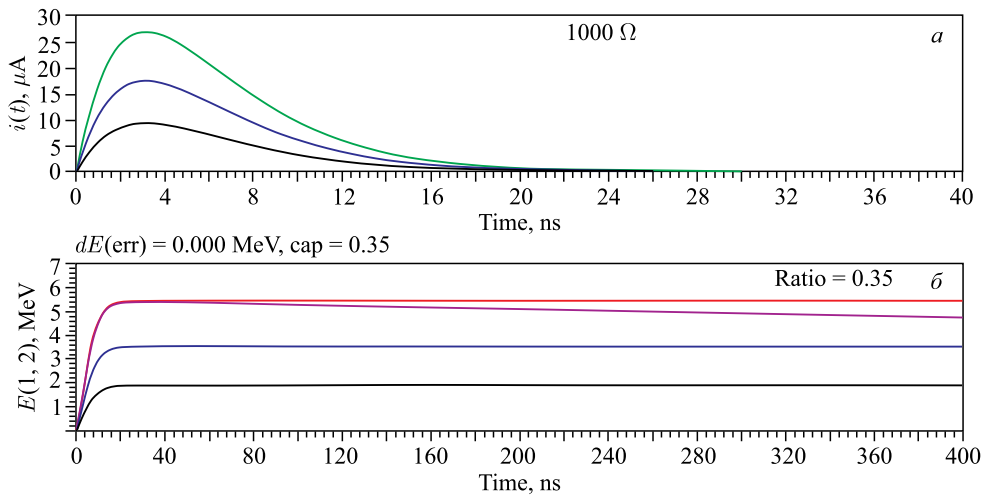


Рис. 2. Типичные зависимости тока неравновесных носителей (а) и собранного заряда (б) от времени

Ниже представлена исходная система уравнений и начальное условие для тока.

$$I(t) = i_1(t) + i_2(t), \quad \frac{i_1(t)}{C} + \frac{di_1(t)}{dt} r_1 = \frac{i_2(t)}{C} + \frac{di_2(t)}{dt} r_2,$$

$$I(t) = C_0 \frac{t}{T_p} \exp\left(-\frac{\kappa t}{T_p}\right).$$

Отметим, что T_p — плазменное время согласно модели Сейбта; κ — параметр начального условия (константа). На рис. 2 показано решение системы уравнений для характерных параметров, таких как межстриповое сопротивление (1000 Ом) и емкость обратной связи зарядочувствительного предусилителя (3 пФ).

2. ГИБКИЙ АЛГОРИТМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Все применяемые в последние годы алгоритмы так или иначе использовали корреляционное время $ER-\alpha$ как фиксированный параметр, предсказанный и рассчитанный на основе теоретических моделей и формул. При этом недостатком такого подхода с очевидностью является следующее:

— если время жизни исследуемого нуклида сравнимо или превышает величину заданного интервала, то экспериментаторы рискуют пропустить такое событие, как триггер останова пучка;

— если величина интервала намного превосходит величину времени жизни нуклида, то детектирующая система генерирует избыточное количество остановов, что приводит к потере времени облучения мишени.

Смысл же и отличие предлагаемого алгоритма заключается в следующем тезисе: пусть в каждый момент времени система сама выбирает с учетом конкретных факторов данный временной интервал автоматически. А единственным критерием ограничения сверху данного интервала является допустимо малая фиксированная величина потерь времени облучения мишени.

Сценарий оптимизации процесса набора данных — остановов пучка — может заключаться в существовании двух независимых условий, задаваемых экспериментатором, как для величины параметра относительных потерь времени облучения мишени, так и для возможности распада нуклида за время τ_{PS} (время паузы).

Система уравнений, оптимизирующих процесс, будет иметь вид

$$\eta(t) \leq \varepsilon,$$

$$P_{\text{dec}}(\tau_{PS}) \geq 1 - \xi,$$

где ε , $\xi \ll 1$ — параметры, задаваемые экспериментатором, причем $P_{\text{dec}}(t) = 1 - e^{-\lambda \tau_{PS}}$, где λ — предполагаемая постоянная распада¹. Рассмотрим случай, более типичный для практики газонаполненного сепаратора, — корреляцию $ER-\alpha$. Здесь P_{dec} — вероятность распада, η — величина относительных потерь времени облучения мишени, N — эффективное количество пикселей DSSSD детектора (128×48 в нашем случае), t — корреляционное время, τ_{PS} — время паузы облучения мишени.

¹ Например, теоретическая оценка или то или иное применение формулы Вайолы–Сиборга.

В этом случае $\eta = N/2P_1^{\text{ER}}P_1^\alpha(\tau_{\text{PS}}/t)$, где $P_1^{\text{ER}} = 1 - e^{-\nu_{\text{ER}}t}$, $P_1^\alpha(t) = 1 - e^{-\nu_\alpha t}$ (P^{ER} и P^α — вероятности случайных сигналов рекойлов и α -частиц на интервале $(0, t)$ соответственно).

Пусть τ_1 и τ_2 — корни первого и второго уравнений (в случае равенства).

Преобразуем последнее уравнение к параметрам загрузок на весь детектор в предположении однородности. Тогда $F_{\text{ER}} = N\nu_{\text{ER}}$ и $F_\alpha = N\nu_\alpha$, соответственно

$$P_1^{\text{ER}}(t) = 1 - \exp\left(-\frac{F_{\text{ER}}t}{N}\right) \quad \text{и} \quad P_1^\alpha(t) = 1 - \exp\left(-\frac{F_\alpha t}{N}\right),$$

$$\eta = \frac{\tau_{\text{PS}}}{2t} \left(1 - \exp\left(-\frac{F_{\text{ER}}t}{N}\right)\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{F_\alpha t}{N}\right)\right).$$

Это и есть соотношения, которые можно применить для соответствующей функции (подпрограммы) кода REDSTORM2 [7].

3. ИМПЛЕМЕНТАЦИЯ ПОДПРОГРАММЫ АЛГОРИТМА

Данный алгоритм реализован как подпрограмма программного пакета REDSTORM2 для варианта учета среднего значения загрузок сигналов, имитирующих ядра отдачи и α -частицы. При этом нормировка на изменение реальных средних загрузок в данный момент времени производится при считывании с блока-интенсиметра суммарных загрузок всех АЦП сигналов детектора фокальной плоскости сепаратора типа «мертвое время» блоков ADP-16 (см. [7]). Разумеется, предполагаем, что за типичные корреляционные времена интенсивность пучка является слабо изменяющейся величиной.

На рис. 3 представлена блок-схема процесса определения временного интервала для останова пучка ДЦ-280. Вычисление текущего параметра корреляционного времени проводится после регистрации сигнала α -частицы (помечено **). Соответствующий код функции (подпрограммы) представлен ниже. Коррекция нового значения времени паузы делается по пропорциональной шкале (возможны и другие варианты).

```
void_fastcall TForm1::Timer1Timer(TObject *Sender)
{
    intens= float(Form1->Kk009Pci1->MemW[0x400*intensimeter+2*2]) ; // Icshakeev
    Driver , PCI
    asm jmp nop;
    ints[n]= intens;
    n ++;
    if (intens >J_threshold && ints[n-1] >J_threshold)
    {
        ratio = ints[n-1]/ints[n]*eta_etalon/eta; // n >1
        tps = tps*ratio;
    };
    tps=ratio*tps;
}
// _____ Builder C++ codinf on Timer_____
```

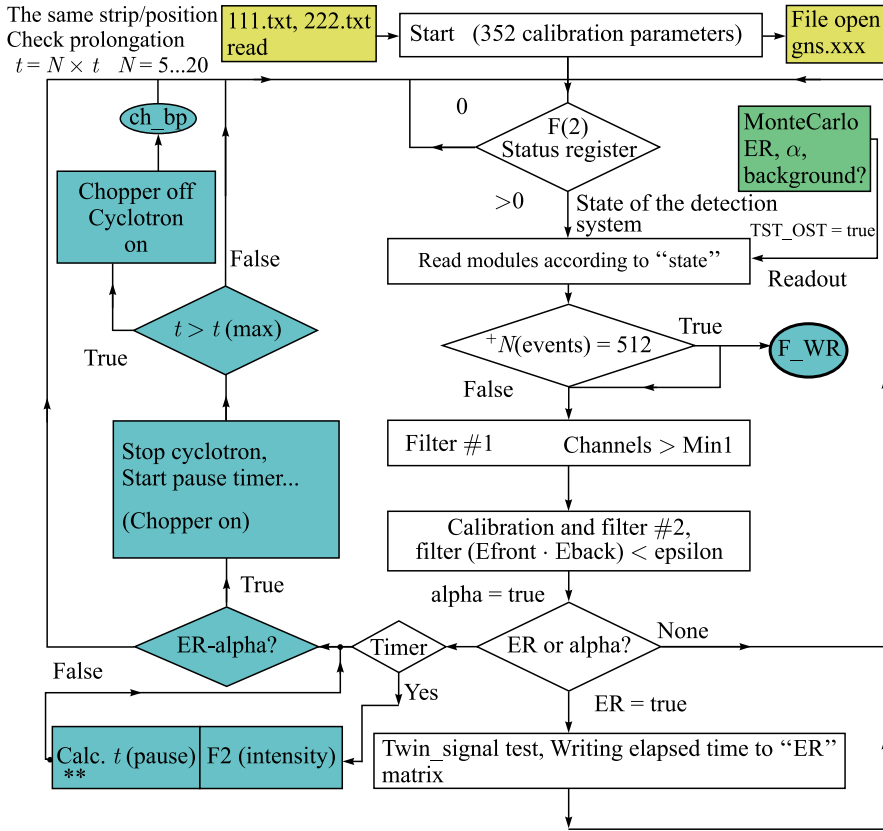


Рис. 3. Блок-схема программы REDSTORM2 с применением гибкого алгоритма реального времени

Здесь переменная η подсчитана по вышеприведенной формуле, η_{etalon} — заданное экспериментатором значение, $\text{ints}[\dots]$ — массив величин относительных потерь времени облучения мишени, $n > 1$ — номер замера (onTimer), tps — текущее значение времени паузы.

4. ИТЕРАЦИОННЫЙ (МЕДЛЕННЫЙ) АЛГОРИТМ

Данный алгоритм предполагает минимум расчетов по ходу выполнения программы набора данных благодаря привязке к результату, по которому и происходит оптимизация. А именно по допустимой, с точки зрения экспериментатора, величине относительных потерь времени облучения мишени η . При этом в качестве первого приближения величины корреляционного интервала $\tau_{\text{ER-}\alpha}$ задается некоторое расчетное значение, как это было прежде [1–5]. Поскольку система регистрирует количество за определенный момент времени, она в состоянии производить самонастройку по параметру относительных потерь времени облучения мишени. Достоинством такого подхода с очевидностью является его простота. К числу недостатков, прежде всего, следует отнести медлительность работы из-за малой статистики остановов за приемлемый интервал времени. Например, пусть при времени паузы 1 мин экспериментатора интересует уровень потерь менее 1%.

Это, в свою очередь, означает, что за 8 ч облучения мишени экспериментатор должен наблюдать примерно $n = 8 \times 3600/60 \times 0,01 \approx 5$ остановов пучка, что статистически вряд ли достаточно для принятия решения системой детектирования об изменении временного корреляционного интервала в ту или другую сторону. Тем не менее данный алгоритм может быть полезен при высоких нагрузках DSSSD детектора фокальной плоскости сепаратора и допустимом уровне потерь порядка $\sim 10\%$. Отметим, что поправка на изменение средней интенсивности пучка будет носить среднеквадратичный обратно пропорциональный характер $\tau_{n+1}^{ER-\alpha} \approx \tau_n^{ER-\alpha} (f_n/f_{n+1})^2$, где n — номер итерации, f — нагрузка фокального детектора.

5. КОМБИНИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ

Поскольку первый алгоритм является сугубо расчетным, а второй эмпирическим, но очевидно более медленным, то возможно применение комбинированного варианта, а именно: в момент выполнения медленного эмпирического алгоритма сравнивать оба поправочных значения и в качестве оптимального значения брать среднегеометрическую величину.

Поскольку, как указано выше, недостатком данного подхода является малость статистики остановов пучка, то разумно сделать привязку выполнения процедуры-функции к данному количеству N_{ost} .

Ниже представлен C++ код функции.

```
// ...
void _fastcall combine_algo();
{
ints[nost]= intens;
nost++;
if (nost == N_ost && n >0 )
{
ratio = ints[nnost]/ins[n+1];
intens= float(Form1->Kk009Pci1->MemW[0x400*intensimeter+2*2]) ;
tau[nost+1]= tau[nost]*ratio;
nost=0;
pause= sqrt(tau*tps); /* tps- вычислено по первому, расчетному алгоритму */
}
}
```

Кроме того, для более точного вычисления средних величин тока тяжелых ионов и нагрузок фокального детектора возможно формирование соответствующих массивов с частотой гораздо выше частоты формирования нового времени паузы.

ВЫВОДЫ

С вводом в эксплуатацию интенсивного циклотрона тяжелых ионов ДЦ-280 ЛЯР ОИЯИ актуальность методов подавления фона при регистрации редких событий α -распада возрастает многократно. Один из таких подходов для достижения цели — применение гибкого алгоритма реального времени. При работе системы набора данных на основании

данного алгоритма необходимо учитывать краевые эффекты, возникающие в DSSSD детекторе, для соседних стрипов со стороны p - n -перехода. Возможны и другие сценарии, например регистрация цепочек типа ER- α - α вместо ER- α в качестве триггера останова пучка. Один дополнительный вывод общего содержания можно сформулировать следующим образом: с развитием ускорительной и компьютерной техники роль алгоритмов реального времени в экспериментах на пучках тяжелых ионов по поиску редких распадов тяжелых ядер будет расти неуклонно.

Автор благодарен своим коллегам Л. Шлаттауэру и А. А. Воинову за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tsyganov Yu. S., Polyakov A. N., Sukhov A. M.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 513. P. 413–416.
2. *Цыганов Ю. С.* Препринт ОИЯИ Р7-2018-71. Дубна, 2018.
3. *Цыганов Ю. С.* // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, №1(192). С. 128–135.
4. *Tsyganov Yu. S., Polyakov A. N., Subbotin V. G., Iliev S. N., Sukhov A. M., Voinov A. A., Tomin V. I.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 525. P. 213–216.
5. *Цыганов Ю. С.* // ЭЧАЯ. 2009. Т. 40, вып. 6. С. 1563–1602.
6. *Seibt W., Sundström K. E., Tove P. A.* // Nucl. Instr. Meth. 1973. V. 113. P. 317–324.
7. *Цыганов Ю. С., Казача В. В., Поляков А. Н., Воинов А. А.* // ЭЧАЯ. 2018. Т. 45, вып. 5–6. С. 1485–1531.

Получено 18 июня 2019 г.