

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДА ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

А. Е. Здарьев, С. А. Лазарев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

В космическом пространстве (КП) космические аппараты (КА) подвергаются воздействию ионизирующих излучений (ИИ), которые состоят из протонов и ионов солнечных космических лучей, протонов и тяжелых ядер галактических космических лучей, протонов и электронов радиационных поясов Земли.

В результате взаимодействия ионизирующего излучения космического пространства (ИИ КП) с устройствами КА возможны отказы и сбои в интегральных схемах (ИС), которые могут возникать:

- а) по мере накопления дозы от ИИ;
- б) от воздействия отдельных высокоэнергетических тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ).

При попадании ТЗЧ в кристалл ИС, направление движения заряженной частицы сохраняется практически неизменным до тех пор, пока преобладают ионизационные потери энергии. При этом энергия первичного иона в полупроводнике расходуется в частности на образование электронно-дырочных пар. Электроны и дырки участвуют в переносе электрического заряда в полупроводниковом кристалле, что приводит к возникновению кратковременных токов, которые изменяют потенциалы узлов в схеме, что в свою очередь ведёт к потере информации в ячейках памяти.

Для оценки количества одиночных сбоев (ОС) в ИС от воздействия отдельных ТЗЧ существует несколько моделей. Одной из них является интегральная модель прямоугольного параллелепипеда [1]. В данной модели используется экспериментальная зависимость сечения ОС от линейной передачи энергии (ЛПЭ), позволяющая оценить поперечные размеры чувствительной области (ЧО) ИС. Глубина чувствительной области принимает значения в диапазоне от 1 до 5 мкм в зависимости от технологии ИС.

В данной работе анализировалась возможность экспериментальной оценки параметров интегральной модели прямоугольного параллелепипеда. Для этого проводилось численное моделирование эксперимента и обработка его результатов методом максимального правдоподобия. Актуальность работы состоит в совершенствовании методов экспериментального определения характеристик сбоеустойчивости ИС.

Модель прямоугольного параллелепипеда

В интегральной модели прямоугольного параллелепипеда используются следующие приближения [1]:

- энерговоыделение в чувствительной области равно потере энергии проходящего через неё иона;
- все чувствительные элементы в ИС имеют одинаковые ЧО;
- пороговые значения ЛПЭ для каждой ЧО в ИС являются одинаковыми;
- значение ЛПЭ ТЗЧ является постоянной величиной в пределах ЧО и не зависит от пройденного расстояния, поскольку глубина ЧО значительно меньше длины пробега отдельной ядерной частицы в кремнии.
- разные ионы с одной и той же ЛПЭ вызывают один и тот же эффект.

Модель ЧО в виде прямоугольного параллелепипеда со сторонами a , b , c представлена на рис. 1. Если ТЗЧ выделила в этом объёме энергию выше порогового значения ΔE , то возникает ОС в ИС. Это означает, что, если чувствительная область характеризуется только пороговой энергией, то частота возникновения ОС будет зависеть от распределения длин пробегов ТЗЧ (распределения хорд).

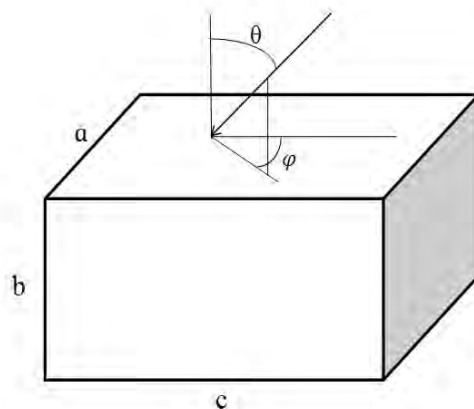


Рис. 1. Модель прямоугольного параллелепипеда

В случае направленного потока ТЗЧ, который обычно используется в экспериментальных исследованиях, справедлив следующий подход для оценки количества ОС v для одной ЧО:

$$v = \sigma(a, b, c, l, \theta) \cdot \Phi, \quad (1)$$

где Φ – флюенс ТЗЧ; a, b, c – ширина, высота, длина прямоугольного параллелепипеда; l – минимальная длина пробега ТЗЧ в ЧО для возникновения ОС; θ – полярный угол падения ТЗЧ на поверхность ЧО; $\sigma(a, b, c, l, \theta)$ – сечение ОС. Оно численно равно площади проекции подобласти ЧО на плоскость перпендикулярную направлению падения ТЗЧ. Для определения этой площади необходимо найти все точки пересечения плоскости, перпендикулярной направлению падения ТЗЧ, с прямыми, вдоль которых движутся ТЗЧ имеющие длину пробега в ЧО большую или равную l . Для сечения ОС получено следующее выражение:

$$\sigma(a, b, c, l, \theta) = \begin{cases} \frac{ac}{\cos \theta} + ab \sin \theta - ac \sin \theta \tan \theta - 2al \sin \theta \cos \theta, & \tan \theta \leq \frac{b}{c} \\ \frac{ab}{\sin \theta} + ac \cos \theta - ab \frac{\cos \theta}{\tan \theta} - 2al \sin \theta \cos \theta, & \tan \theta > \frac{b}{c} \end{cases} \quad (2)$$

Выражение (2) справедливо при условиях:

$$l \sin \theta \leq c; \quad l \cos \theta \leq b; \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

Формула (2) применяется, когда направленный поток ТЗЧ распространяется при произвольном полярном угле θ и при азимутальном угле $\varphi = 0^\circ$. Для угла $\varphi = 90^\circ$ происходит замена параметров: $a \rightarrow c$ и $c \rightarrow a$.

Метод максимума правдоподобия

Функция правдоподобия представляет собой следующее выражение:

$$P = \prod_{i=1}^N f_{i\Phi} f_{iv} \quad (4)$$

N – число экспериментов;

Плотности распределения вероятности $f_{i\Phi}$ и f_{iv} имеют вид:

$$f_{i\Phi} = \frac{1}{\sigma_{i\Phi} \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\Phi_i - \Phi_i^0)^2}{2(\sigma_{i\Phi})^2}}, \quad (5)$$

$$f_{iv} = \frac{1}{\sigma_{iv} \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(v_i - v_i^0)^2}{2(\sigma_{iv})^2}}, \quad (6)$$

где Φ_i – значение флюенса в i -ом эксперименте;

$\sigma_{i\Phi}$ – среднее квадратическое отклонение случайной величины Φ_i от Φ_i^0 в i -ом эксперименте;

Φ_i^0 – оценённое значение флюенса ТЗЧ в i -ом эксперименте;

v_i – количество зарегистрированных одиночных сбоев в i -ом эксперименте;

σ_{iv} – среднее квадратическое отклонение случайной величины v_i от v_i^0 в i -ом эксперименте;

v_i^0 – оценённое значение числа сбоев в i -ом эксперименте.

Подставляя выражения (5) и (6) в (4) и логарифмируя (4), получим [2]:

$$-\ln(P) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{(\Phi_i - \Phi_i^0)^2}{2(\sigma_{i\Phi})^2} + \ln(\sigma_{iv}) + \frac{(v_i - v_i^0)^2}{2(\sigma_{iv})^2} + \frac{1}{2} \ln((\sigma_{iv})^2) \right]. \quad (7)$$

Был рассмотрен случай, когда значение флюенса частиц Φ_i известно точно. Тогда в формуле (7) можно пренебречь первым и вторым слагаемыми при оценке параметров прямоугольного параллелепипеда. Из (7) следует:

$$-\ln(P) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{(v_i - v_i^0)^2}{2(\sigma_{iv})^2} + \frac{1}{2} \ln((\sigma_{iv})^2) \right], \quad (8)$$

где среднее квадратическое отклонение числа одиночных сбоев σ_{iv} оценивалось по формуле:

$$\sigma_{iv} = \sqrt{\max(1, v_i^0)} = \sqrt{\max[1, \sigma(L_i, \theta_i) \Phi_i^0]}, \quad (9)$$

здесь L_i, θ_i , – значения ЛПЭ, угла падения ТЗЧ в i -ом эксперименте; $\sigma(L_i, \theta_i)$ – сечение ОС интегральной схемы, вычисляемое из выражения:

$$\sigma(L_i, \theta_i) = M \cdot \sigma(a, b, c, l_i, \theta_i), \quad (10)$$

M – количество чувствительных областей в ИС.

Чтобы оценить параметры: $a, b, c, \Delta E$, необходимо найти наименьшее значение выражения (8). Для оценки относительных отклонений параметров $a, b, c, \Delta E$, вычислялась матрица ошибок, на главной диагонали которой расположены оценки дисперсий параметров: $a, b, c, \Delta E$. Матрица ошибок является обратной к матрице вторых производных от логарифма функции правдоподобия по параметрам модели.

Для расчёта центральных производных от выражения (8) использовалась формула:

$$\frac{\partial L}{\partial h} = \frac{L(x(1+h)) - L(x(1-h))}{2h}, \quad (11)$$

где h – значение шага, на которое изменяются параметры прямоугольного параллелепипеда при численном нахождении производной:

$$L = -\ln(P), \quad (12)$$

x – параметр модели прямоугольного параллелепипеда ($a, b, c, \Delta E$).

Величина h выбиралась из диапазона значений, на котором значения оценок относительных отклонений параметров остаются постоянными.

Исходные данные и результаты вычислений

В качестве исходных данных использовались значения полярных углов падения ТЗЧ: $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 80^\circ$, значения ЛПЭ для каждого полярного угла: 2, 6, 15, 40, 69, 100 МэВ·см²/мг, а также значения параметров модели прямоугольного параллелепипеда, указанные в табл. 1. Флюенс принимал значения из диапазона: 10^{-2} – 10^{-6} частиц/мкм². Количество ЧО M в ИС: 10^6 . Азимутальный угол φ принимал значения 0° и 90° . $\varphi = 0^\circ$ соответствует движению ТЗЧ перпендикулярно стороне a прямоугольного параллелепипеда, $\varphi = 90^\circ$ – движению перпендикулярно стороне c .

Таблица 1
Значения исходных параметров модели
прямоугольного параллелепипеда

a , мкм	b , мкм	c , мкм	ΔE , МэВ
5	2	5	0.3
4	2	4	0.3
2	2	8	0.3
1	2	16	0.3

Проведена оценка относительных отклонений параметров прямоугольного параллелепипеда методом максимума правдоподобия. Рассматривалось 2 случая: падение ТЗЧ при азимутальном угле $\varphi = 0^\circ$ и падение ТЗЧ при двух значениях $\varphi = 0^\circ$ и 90° .

В первом случае в результате оценки относительных отклонений оказалось, что они существенно зависят от малого изменения параметра h . При оценке четырёх параметров модели прямоугольного параллелепипеда, вычисления дали результаты, показанные на рис. 2, из которых следует, что оценки относительных отклонений не сохраняют постоянные значения ни в каком диапазоне значений параметра h . Это значит, что оценить четыре параметра интегральной модели прямоугольного параллелепипеда нельзя.

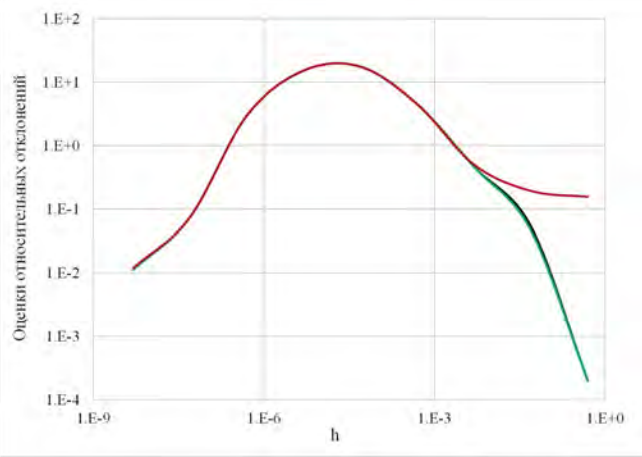


Рис. 2. Зависимости оценок относительных отклонений параметров $a, b, c, \Delta E$ от шага h для случая: $a = 2$ мкм, $b = 2$ мкм, $c = 8$ мкм, $\Delta E = 0.3$ МэВ. Флюенс: 0,0001 частиц/мкм²

Зависимости оценок относительных отклонений для остальных исходных значений параметров $a, b, c, \Delta E$, приведённых в табл. 1, от h имеют аналогичный характер.

При оценивании трёх параметров a, b, c (параметр ΔE – не оценивался) оценки относительных отклонений сохраняют постоянные значения (менее 15 %) в диапазоне значений параметра h от 10^{-5} до 10^{-3} (рис. 3). При оценивании трёх параметров $a, b, \Delta E$ решение задачи также является устойчивым. Параметр c в этом случае вычислялся по формуле:

$$c = \frac{\sigma}{a}, \quad (14)$$

здесь σ – сечение насыщения при нормальном падении ТЗЧ. Зависимости оценок относительных отклонений параметров прямоугольного параллелепипеда представлены на рис. 4, из которого видно, что значение шага h можно выбрать из диапазона от 10^{-6} до 10^{-2} . Значения оценок относительных отклонений не превышают 14 %.

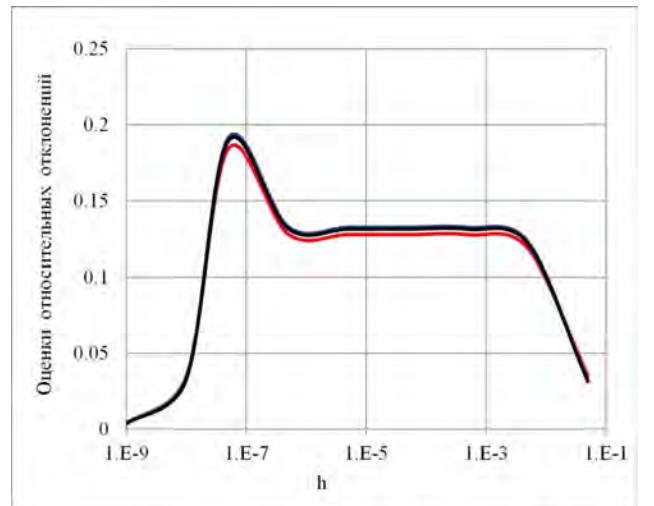


Рис. 3. Зависимости оценок относительных отклонений параметров a, b, c от шага h для случая: $a = 2$ мкм, $b = 2$ мкм, $c = 8$ мкм, $\Delta E = 0,3$ МэВ. Флюенс: 0,0001 частиц/мкм²

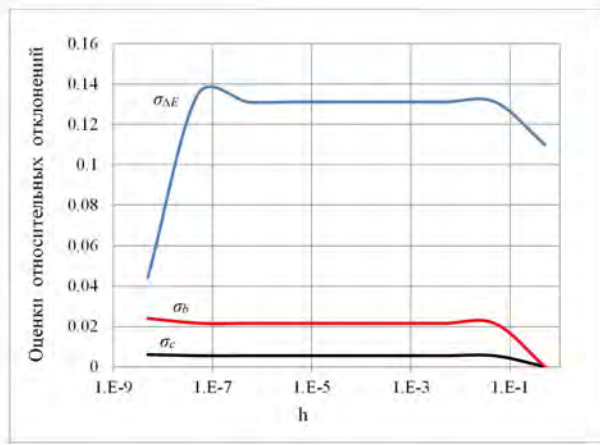


Рис. 4. Зависимости оценок относительных отклонений параметров a , b , ΔE от шага h для случая: $a = 2$ мкм, $b = 2$ мкм, $c = 8$ мкм, $\Delta E = 0,3$ МэВ. Флюенс: $0,0001$ частиц/мкм²

Зависимости относительных отклонений от флюенса частиц показаны на рис. 5.

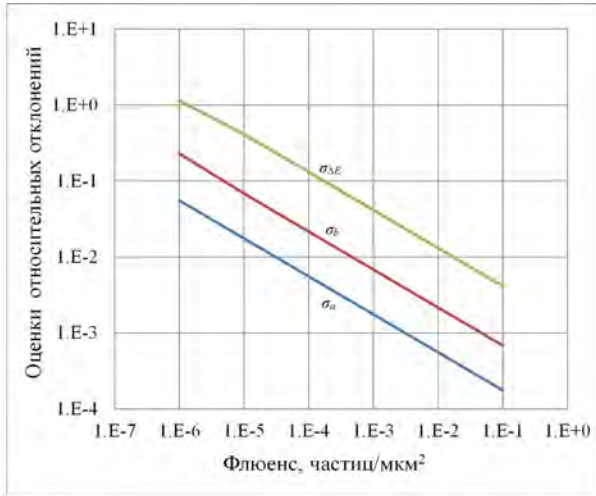


Рис. 5. Зависимости оценок относительных отклонений параметров a , b , ΔE от флюенса частиц для случая: $a = 2$ мкм, $b = 2$ мкм, $c = 8$ мкм, $\Delta E = 0,3$ МэВ

Из рис. 5 следует, что, для того, чтобы оценки относительных отклонений параметров прямоугольного параллелепипеда были меньше 1 %, необходимо провести эксперимент так, чтобы минимальное значение флюенса было не менее, чем 10^{-1} частиц/мкм². При значении флюенса 10^{-3} частиц/мкм² оценки составляют менее 10 %. Если флюенс равен 10^{-6} частиц/мкм², то оценка относительного отклонения параметра $\Delta E = 0,3$ МэВ превосходит 100 %, и поэтому оценить его (параметр ΔE) становится невозможным.

Зависимости на рис. 2–5 относятся к случаю, когда азимутальный угол флюенса ТЗЧ на ЧО составлял 0° . В этом случае, как показано на рис. 2, нельзя оценить все четыре параметра одновременно методом максимума правдоподобия. Поэтому проводи-

лась оценка четырёх параметров, в условии которой азимутальный угол ϕ изменялся и принимал значения 0° и 90° (количество экспериментов при этом увеличилось в 2 раза).

В результате оценки относительных отклонений оказалось, что они также существенно зависят от малого изменения параметра h . Поэтому оценка четырёх параметров модели невозможна, как и в случае, когда азимутальный угол ϕ принимал значение только 0° . Зависимости оценок относительных отклонений от шага h для параметров, указанных в табл. 1, имеют аналогичный характер, что и на рис. 2.

При оценке трёх параметров a , b , c или a , b , ΔE решение задачи устойчиво. Зависимости оценок относительных отклонений параметров прямоугольного параллелепипеда от h для параметров, указанных в табл. 1, аналогичны изображённым на рис. 3 и 4 соответственно.

Зависимость оценок относительных отклонений от флюенса ТЗЧ представлена на рис. 6.

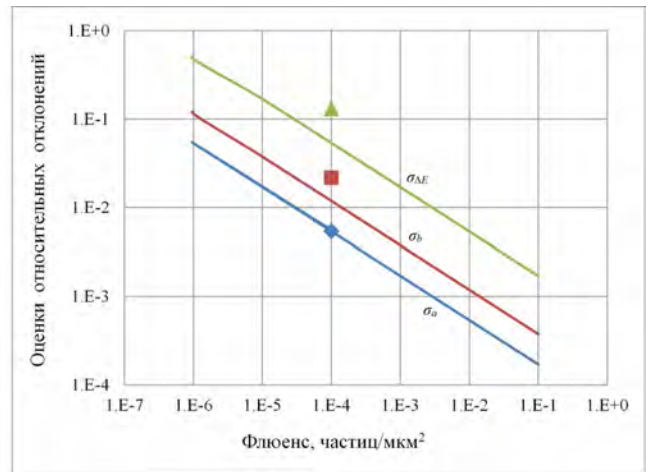


Рис. 6. Зависимости оценок относительных отклонений параметров a , b , ΔE от флюенса частиц для случая: $a = 2$ мкм, $b = 2$ мкм, $c = 8$ мкм, $\Delta E = 0,3$ МэВ. Угол $\phi = 0^\circ, 90^\circ$

Из рис. 6 следует, что для того, чтобы оценки относительных отклонений параметров прямоугольного параллелепипеда были меньше 1 %, необходимо провести эксперимент так, чтобы минимальное значение флюенса было не меньше чем 10^{-2} частиц/мкм². Чтобы оценки не превосходили 10 % можно использовать минимальное значение флюенса равное 10^{-4} частиц/мкм². Если флюенс $\leq 10^{-7}$ частиц/мкм², то оценка параметра ΔE становится невозможной. Маркеры на рис. 6 показывают оценки относительных отклонений параметров прямоугольного параллелепипеда при $\phi = 0^\circ$.

Используя результаты анализа модели прямоугольного параллелепипеда, были обработаны экспериментальные данные, взятые из статьи [3]. В ней описывался эксперимент, проведённый при различных значениях полярного угла θ , и двух значениях азимутального угла ϕ : $0^\circ, 90^\circ$. Оценены три парамет-

ра a , b , ΔE , указанные в табл. 2, а также построена зависимость сечения одиночных радиационных эффектов (ОРЭ) от ЛПЭ (рис. 7).

Таблица 2
Оценки параметров

a , мкм	b , мкм	c , мкм	ΔE , МэВ
$0,524 \pm 0,010$	$0,252 \pm 0,005$	0,530	$0,795 \pm 0,015$

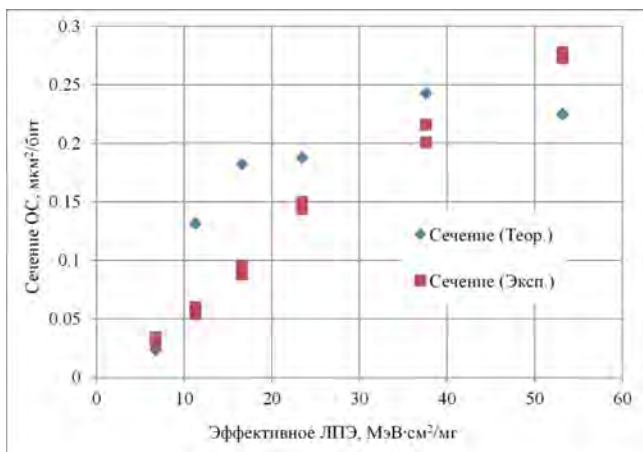


Рис. 7. Зависимость сечения ОРЭ от эффективной ЛПЭ ТЗЧ. Флюенс частиц составляет $0,0001$ частиц/мкм². Количество чувствительных областей: 16777216

Заключение

На основе анализа обработки результатов испытания микросхемы памяти на воздействие ТЗЧ с применением интегральной модели прямоугольного параллелепипеда показано, что:

– оценить четыре параметра интегральной модели прямоугольного параллелепипеда невозможно;

– возможна оценка трёх любых параметров интегральной модели прямоугольного параллелепипеда, причём при увеличении значения флюенса частиц точность оценки параметров увеличивается;

– точность оценки ширины, высоты прямоугольного параллелепипеда, пороговой энергии – выше точности оценок только геометрических размеров ЧО;

– использование экспериментальной зависимости сечения сбоев от ЛПЭ при двух значениях азимутального угла $\varphi = 0^\circ, 90^\circ$ более чем в 2 раза повышает точность оценки ширины и высоты прямоугольного параллелепипеда и пороговой энергии.

Литература

1. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004. С. 320.
2. Гаганов В. В., Грунин А. В., Дроздов И. Ю., Игнатов К. А., Киселёв Ф.К., Крылевский Е. Н., Кудрявцев Ю. Г., Лазарев С. А., Музюкин К. М., Силаев А. В., Цыганков Б. В., Петрикович Я. Я., Гусев В. В., Мироненко Л. П., Методические особенности обработки результатов испытаний микросхемы памяти на воздействие отдельных тяжёлых заряженных частиц. Труды II российско-белорусской научно-технической конференции «элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение» им. О. В. Лосева. Нижний Новгород, 2015, с. 119–125.
3. V. Correias, F. Saigne, B. Sagnes, J. Boch, G. Gasiot, D. Giot, P. Roche, Innovative simulations of heavy ion cross sections in 130 nm CMOS SRAM // IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE. 2007. Vol. 54, no. 6, p. 2413–2418.