

тройных сплавов на основе висмута, индия и олова показали, что наблюдается формирование двойных текстур висмута ($10\bar{1}2$) + (0001), ϵ -фазы (InBi) (102) + (101) и олова (100), соответственно.

Таблица 2. Полусные плотности дифракционных линий ϵ - и γ -фазы фольги сплава $\text{Bi}_{32}\text{In}_{41}\text{Sn}_{27}$

Дифракц. линии	ϵ -фаза	Дифракц. линии	γ -фаза
111	0,6	$10\bar{1}1$	0,0
200	0,3	$11\bar{2}0$	0,1
002	0,2	0002	5,2
102	0,7	$11\bar{2}1$	0,2
211	2,0	$20\bar{2}0$	0,1
112	2,0	$20\bar{2}1$	0,4
220	1,7	-	-
202	0,8	-	-
212	0,7	-	-

Таким образом, формирование текстуры олова, индия и висмута, а также бинарных и тройных сплавов на их основе определяется плотностью атомов в плоскостях и ориентацией ковалентных связей.

Литература

1. Мирошниченко, И. С. Закалка из жидкого состояния / И. С. Мирошниченко. – М.: Metallurgia, 1982. – 168 с.
2. Гусакова, О. В. Зеренная структура и текстура быстрозатвердевших фольг олова, полученных при различных режимах сверхбыстрого охлаждения / О. В. Гусакова, В. Г. Шепелевич // *Материалы, технологии, инструменты*. – 2010. – Т. 15, № 2. – С. 54–57.
3. Шепелевич, В. Г. Текстура быстрозакаленных фольг висмута, сурьмы и их сплавов / В. Г. Шепелевич // *Кристаллография*. – 1991. – Т. 36, № 1. – С. 238–239.

УДК 621.315.592; 539.12.04

МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОЗБУЖДЕННЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ ПРИБОРОВ ЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ

Ювченко В.Н., Комаров А.Ф., Мискевич С.А., Ермолаев А.П.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Проведены расчеты пространственно-временной эволюции концентрации носителей заряда для начальных стадий формирования трека иона (до 10^{-13} с) в кремниевых структурах, облучаемых ионами Fe и Xe с энергиями до 547 МэВ. Рассчитанная максимальная концентрация возбужденных электронов в центральной области трека иона Xe с энергией 547 МэВ составляет $1,6 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$ и сохраняется равной $5,4 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ к моменту времени 100 фс. Получены аналитические приближения рассчитанных зависимостей концентрации электронов от времени и расстояния до центра трека иона.

Ключевые слова: кремниевые приборные структуры, одиночные случайные эффекты, быстрые тяжелые ионы, моделирование, метод Монте-Карло.

THE MODEL OF TIME AND SPACE EVOLUTION OF EXCITED CARRIERS DENSITY IN THE ACTIVE REGION OF ELECTRONICS DEVICES IRRADIATED WITH HIGH-ENERGY IONS

Yuvchenko V., Komarov A., Komarov F., Yermalaeu A.

*A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems BSU
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Time and space evolution of excited carriers density for the initial stages (up to 10^{-13} s) of ion track formation in the silicon structures irradiated with Fe and Xe ions have been simulated. The calculated maximum concentrations of excited electrons in the central region of Xe ion track with an energy of 547 MeV is $1,6 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ and remains as high as $5,4 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ by the time of 100 fs. Analytical approximations of calculated dependencies are obtained.

Key words: silicon transistor structures, single event effects, swift heavy ions, simulation, Monte-Carlo method.

*Адрес для переписки: Ювченко В.Н., ул. Курчатова, 7, Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: yuvchenko@bsu.by*

Актуальной задачей при производстве интегральных микросхем и дискретных силовых МОП-транзисторов, используемых в космических аппаратах, является повышение их радиационной стойкости к одиночным случайным эффектам (ОСЭ) как непосредственно от тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), входящих в состав

космических лучей, так и от вторичных ионов, создаваемых в результате ядерных столкновений протонов космической радиации с ядрами вещества. Энергии, выделенной такой частицей в приборной структуре, достаточно, чтобы произвести на очень короткое время сверхвысокоплотную электронную плазму вдоль траектории иона. Со-

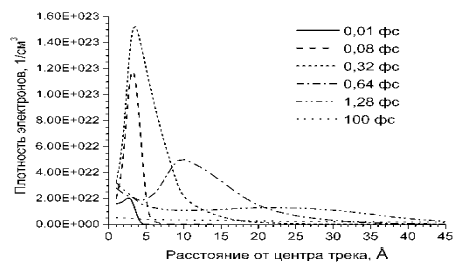
ставляющие ее электронно-дырочные пары увлекаются дрейфом и/или диффузией, образуя дополнительный накопленный заряд, который, в свою очередь, может вызывать ОСЭ, такие как вторичный пробой, связанный с открытием паразитного биполярного транзистора при пролете заряженной частицы (Single-Event Burnout – SEB) и пробой подзатворного диэлектрика (Single-Event Gate Rupture – SEGR).

Модели ОСЭ, используемые в программных комплексах для моделирования приборов микроэлектроники, (например, Atlas фирмы Silvaco и Setaurus Device фирмы Synopsis) используют величину линейных потерь энергии (ЛПЭ) в качестве основного параметра, характеризующего как налетающую частицу, так и материал чувствительного объема прибора. Однако анализ экспериментальных данных показывает, что для ионов с одинаковой ЛПЭ, но разной скоростью наблюдаются разные накопленные заряды и сечения ОСЭ как в силовых МОПТ, так и в глубоко субмикронных КНИ-микросхемах памяти [1].

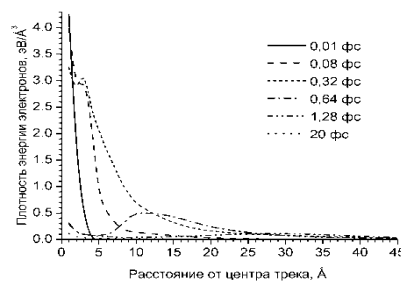
Методы. Для расчета пространственно-временной эволюции концентраций возбужденных электронов, валентных дырок и дырок на глубоких атомных уровнях в кристаллическом кремнии, создаваемых в области трека высокоэнергетического иона, использован программный комплекс TREKIS-3 [2, 3], позволяющий моделировать пролет одиночного иона в невозмущенном материале методом Монте-Карло. Модель учитывает первичную ионизацию материала налетающей ТЗЧ; пространственное распределение создаваемых быстрых электронов и кинетику вызываемых ими ионизационных каскадов; релаксацию дырок глубоких атомных оболочек, созданных ионизацией, включая Оже- и радиационные процессы распада. Учет коллективной реакции электронной подсистемы мишени на вносимое возбуждение проводился с использованием формализма комплексной диэлектрической функции. Эффективные массы электронов и валентных дырок рассчитывались из плотности состояний. Эффективный заряд налетающего иона рассчитывался по формуле Баркаса. Количество итераций при моделировании составляло 1000; толщина слоя кристаллического кремния 10 нм; время – до 1000 фс после пролета иона.

Результаты расчетов. Расчеты проводились для начальных стадий формирования трека иона в кристаллическом Si, облучаемом ионами Fe с энергией 16 МэВ (ЛПЭ 20,3 МэВ·см²/мг) и Хе с энергией 547 МэВ (ЛПЭ 69,1 МэВ·см²/мг). Результаты расчетов для облучения кремния ионами Хе, E = 547 МэВ приведены на рис. 1. Максимальная концентрация возбужденных электронов в области трека иона Хе наблюдается в момент времени 0,32 фс и составляет 1,6·10²³ см⁻³ на расстоянии 3 Å от траектории иона. К моменту

времени 100 фс избыточная концентрация электронов в центральной области трека составляет 5,4·10²¹ см⁻³ и 2,3·10²¹ см⁻³ для ионов Хе, E = 547 МэВ и Fe, E = 16 МэВ, соответственно. Такие сверхвысокие концентрации носителей заряда могут приводить к возникновению ОСЭ – в частности, вторичному пробой, связанному с открытием паразитного биполярного транзистора в активной области МОП-транзистора, а также к атермическому плавлению трековой области.



а



б

Рисунок 1 – Рассчитанная зависимость плотности возбужденных электронов (а) и плотности энергии в электронной подсистеме Si (б) от радиального расстояния до траектории иона Хе с энергией 547 МэВ для различных моментов времени после пролета иона

Аналитические приближения рассчитанных зависимостей $N_e(r, t)$ получены аналогично приближениям в [4] для плотности энергии в электронной подсистеме, при этом хвост распределения носителей для больших r аппроксимируем распределением Вейбулла с $k = 2$ (см. рис. 2):

$$N_e(r, t) = Ar^k \frac{\left(1 - \frac{r + \theta}{R + \theta}\right)^{\frac{1}{a}}}{r + \theta} (1 + K) + Br \exp\left(-\left(\frac{r}{\lambda}\right)^2\right), \quad (1)$$

где $K = a \left(\frac{r - b}{d} \exp\left(\frac{b - r}{d}\right)\right)$, $\lambda = R / \ln(2)^{1/2}$.

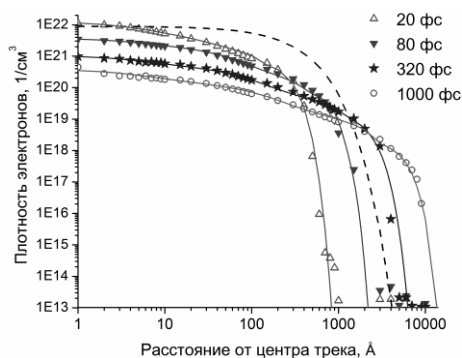
Для иона Fe с энергией 16 МэВ в Si получены следующие значения коэффициентов в (1):

$$\Theta = b = 1 \text{ Å}; k = 0,42; a = 1,5;$$

$$d(t) = 89 - 72 \exp(-t / 4,86 \cdot 10^{-13}),$$

$$R(t) = 5,82 \cdot 10^3 - 5,73 \cdot 10^3 \exp(-t / 1,34 \cdot 10^{-12}).$$

Отметим, что стандартная функция генерации электронно-дырочных пар в треке ТЗЧ ПО Atlas



--- расчет с использованием стандартной функции Atlas (2) с $R_0 = 20$ нм

Рисунок 2 – Аппроксимация рассчитанных зависимостей плотности возбужденных электронов в кристалле Si от радиального расстояния до траектории иона Fe, $E = 16$ МэВ в различные моменты времени

$$G(r, l, t) = L(l) \cdot R(r) \cdot T(t), \quad (2)$$

т. е. форма распределения носителей не меняется со временем, что не согласуется с результатами наших расчетов методом Монте-Карло.

Литература

1. Single-event upsets and multiple-bit upsets on a 45 nm SOI SRAM / D. F. Heidel [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2009. – Vol. 56, № 6. – P. 3499–3504.
2. Medvedev, N. A. Time-resolved electron kinetics in swift heavy ion irradiated solids / N. A. Medvedev, R. R. A. ymzhanov, A. E. Volkov, // J. Phys. D. Appl. Phys. – 2015. – Vol. 48. – P. 355303 (1–24).
3. Rymzhanov, R. A. Effects of model approximations for electron, hole, and photon transport in swift heavy ion tracks / R. A. Rymzhanov, N. A. Medvedev, A. E. Volkov // Nucl. Instrum. Methods B. – 2016. – Vol. 388. – P. 41–52.
4. Waligorski, M. P. R. The radial distribution of dose around the path of a heavy ion in liquid water / M.P.R. Waligorski, R. N. Hamm, R. Katz, // Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part D. – 1986. – Vol. 11 – P. 309–319.

УДК 621.382.323

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОКОНЧАНИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ СЛОЕВ p-GaN И AlGaN В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ ТИПА p-GaN/AlGaN/GaN С ДВУМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ГАЗОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Юник А.Д., Соловьёв Я.А., Шидловский А.Г.

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Методом лазерной интерферометрии и сканирующей электронной микроскопии установлены закономерности изменения во времени интенсивности отраженного сигнала, регистрируемого детектором лазерного интерферометра с рабочей частотой 670 нм, в процессе реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме в атмосфере $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$ слоев p-GaN и AlGaN в гетероструктурах типа p-GaN/AlGaN/GaN. Установлено, что при переходе границы раздела p-GaN/AlGaN и AlGaN/GaN наблюдается скачкообразное изменение интенсивности отраженного сигнала в пределах 2,7–9,5 % в течение 20–40 с, обусловленное изменениями концентрации алюминия, показателей преломления и скорости травления на границах раздела. Полученные результаты позволяют с помощью лазерной интерферометрии в реальном масштабе времени определять время окончания процесса реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме слоев AlGaN и p-GaN в гетероструктурах типа p-GaN/AlGaN/GaN с двумерным электронным газом.

Ключевые слова: плазмохимическое травление, индуктивно-связанная плазма, лазерный интерферометр, нитрид галлия, гетероструктура

DETERMINATION OF THE END TIME OF THE PLASMA-CHEMICAL ETCHING OF p-GaN AND AlGaN LAYERS OF THE p-GaN/AlGaN/GaN HETEROSTRUCTURE WITH TWO-DIMENSIONAL ELECTRON GAS USING LASER INTERFEROMETRY

Yunik A, Solovjov J., Shydlovski A.

JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Regularities of the changing in time of the intensity of the reflected signal recorded by the detector of the laser interferometer with an operating frequency of 670 nm during the inductively coupled plasma reactive ion etching in a $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$ atmosphere of p-GaN and AlGaN in p-GaN/AlGaN/GaN heterostructures has been established by laser interferometry and scanning electron microscopy methods. It has been established that during the crossing of the p-GaN/AlGaN and AlGaN/GaN interface, there is an abrupt change in the intensity of the reflected signal within 2,7–9,5 % for 20–40 s, due to changes in the aluminum concentration, refractive indices, and etching rate at the interfaces. The obtained makes it possible to determine the end time of the inductively coupled plasma reactive ion etching of the AlGaN and p-GaN layers using laser interferometry in real time in p-GaN/AlGaN/GaN heterostructures with two-dimensional electron gas.

Key words: plasma-chemical etching, inductively coupled plasma, laser interferometer, gallium nitride, heterostructure.

Адрес для переписки: Соловьёв Я.А., 20108, Минск, ул. Корженевского, 16, ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Филиал «Транзистор»
e-mail: JSolovjov@integral.by