

УСЛОВИЯ АДДИТИВНОСТИ ОТКЛИКА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НИЗКИХ ИОННЫХ ДОЗ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СТРУКТУРЫ

В.И.Киселев, Л.И.Гурский

Минский НИИ Радиоматериалов, РБ, 220024, г. Минск, ул.Кижеватова, 86,
e-mail: pb9231@belsonet.by

На основе принципа аддитивности накопления дозовых эффектов получены условия принадлежности к классу функций, пригодных для аналитического описания отклика измерительной структуры на воздействие ионных доз менее 10^{11} см⁻². Отклонения от этих условий связаны с проявлением внутренних корреляций. Выделяются методы, различные по природе и характеру таких корреляций, но имеющие общую особенность, состоящую в том, что структуре свойственны два устойчивых аддитивных состояния. Соответственно, в одном из промежуточных состояний вводимый параметр степени неаддитивности имеет наибольшее значение, которое связывается с максимальной неопределенностью механизма внутренних взаимодействий. Для таких методов предложен способ корректировки явного вида аддитивных функций, сохраняющий единственность подгоночного параметра. Результаты работы также могут быть использованы для контролируемого изменения свойств полупроводниковых материалов электронной техники с помощью радиационного облучения различных видов.

1. Введение

Методы косвенного контроля процесса ионной имплантации находят широкое применение в технологии микроэлектроники, позволяя оценить величину дозы D ионов и ее однородность непосредственно на облучаемой мишени.

Сущность этого дозиметрического направления состоит в использовании изменения измеряемого параметра Π тестовых структур при ионной бомбардировке, построении калибровочной зависимости $\Pi(D)$ и, в дальнейшем, оценка дозы через измеренное значение Π по калибровочной кривой.

Целью настоящей работы является выявление некоторых базовых принципов аналитического описания калибровочных кривых косвенного определения доз менее 10^{11} см⁻².

2. Результаты

1. В основу ограничений, налагаемых на вид зависимостей $\Pi(D)$ при малых дозах ионного облучения должен быть положен принцип аддитивности при наборе дозы, и, как следствие, аддитивности функций, описывающих процесс взаимодействия ионного пучка с веществом (эффектов дозы). Возможная неаддитивность может быть учтена путем поправок, которые вводятся в базовые аддитивные функции исходя из конкретного механизма внутренних корреляций. Принцип аддитивности можно сформулировать, например, следующим образом: любая уже набранная доза не оказывает влияния на характер ее последующего накопления.

Математическому выражению этого утверждения можно придать как функциональную, так и дифференциальную формы. В первом случае псевдодискретизация процесса ионного внедрения приводит к функциональному уравнению вида

$$\Pi(\Pi_0, D_1 + D_2) = \Pi(\Pi(\Pi_0, D_1), D_2) \quad (1)$$

Другой подход состоит в том, что изменение параметра дозы не должно в явном виде зависеть

где $g(\Pi)$ - некоторая функция параметра дозы

Простейшим примером может служить уравнение захвата свободных носителей заряда радиационно образованными ловушками в запрещенной зоне, для которого $g(\Pi) = \Pi$.

Интегрирование (2) приводит к простому виду базовых калибровочных кривых методов измерения малых доз

$$f(\Pi) = f(\Pi_0) + kD \quad (3)$$

или

$$f^*(\Pi) = f^*(\Pi_0)e^{-kD}, \quad (3')$$

$$\text{где } f(\Pi) = \int \frac{d\Pi}{g(\Pi)}; f(\Pi) = \ln \frac{1}{f^*(\Pi)}$$

k - параметр, имеющий размерность площади и совокупно характеризующий ионный пучок (энергия, масса микрочастиц) и измерительную структуру, поскольку в общем случае k зависит от Π_0 .

Так, широко известные дозовые зависимости радиационного изменения времени жизни и проводимости [1] удовлетворяют (1)-(3).

2. Невыполнение соотношений (1), (2) свидетельствует о различного рода внутренних взаимодействиях в облучаемом образце.

а) В кристаллических однородных структурах очевидной причиной таких взаимодействий является перекрытие разупорядоченных областей (РО), создаваемых отдельными ионами вдоль треков [2], связанное с началом зарождения α -фазы. Действительно, характер перекрытия РО (и, соответственно, доля аморфной фазы η) описываются формулой

$$\eta = e^{-AD} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(AD)^i}{i!} \quad (4)$$

где n соответствует числу одновременно принимающих участие в α -образовании A -эффективная площадь РО. Подстановка в (1) $\Pi = \Pi_0 g(D)$ приводит к условию аддитивности с

вие какой-либо корреляции РО. Введем параметр λ , характеризующий степень отклонения от условия (5)

$$\lambda = \frac{\eta_n(AD_1)\eta_n(AD_2)}{\eta_n(AD_1 + AD_2)} - 1 = \frac{\eta_n^2(x)}{\eta_n(2x)} - 1; \quad (6)$$

$$x = AD_1 = AD_2.$$

Функция $\lambda(x)$ имеет максимум по n между двумя устойчивыми аддитивными состояниями ($\lambda = 1$ при $n=1$, $n \rightarrow \infty$), соответствующими кристаллической и аморфной фазам. Существование такого максимума формально указывает на наличие некоторой характерной предаморфизационной дозы в процессе фазового перехода, с наибольшей вероятностью относящейся к неопределенной по механизму взаимовлияния РО ситуации $\lambda(2) = \lambda(3)$, т.к. (4) имеет реальный смысл для $n \leq 4$.

б) Форма выражения (4) может быть использована для уточнения калибровочных кривых в случае других типов взаимодействий, но объединенных наличием двух аддитивных крайних состояний. Такие взаимодействия могут иметь место и при $D < 10^{11} \text{ см}^2$, поэтому возможность внесения поправок в (3), (3'), является актуальной для исследуемой темы. В качестве примера "нетрадиционного" внутреннего взаимодействия можно привести пространственную корреляцию между профилями распределения дефектов и носителей заряда по глубине в хорошо разработанном методе двойной имплантации [3]. С помощью ионного легирования и отжига в приповерхностном слое монокремниевой пластины создается резистивный слой, изолированный от остальной части подложки p-n переходом; проводимость σ этого слоя изменяется при малых дозах внедренных ионов и является измеряемым параметром дозы. Наиболее высокая чувствительность к ионному облучению достигается при пространственном совмещении двух вышеуказанных профилей распределения, поскольку при этом обеспечиваются оптимальные возможности заполнения радиационных ловушек свободными носителями заряда. В этом случае проводимость определяется известным аддитивным соотношением $\sigma = \sigma_0 e^{-kD}$. При рассогласовании профилей чувствительность σ к D падает, так что $\sigma \rightarrow \sigma_0$, что также соответствует аддитивному состоянию. Эксперименты показывают, что калибровочные кривые хорошо аппроксимируются зависимостью типа (4)

$$\sigma = \sigma_0 e^{-kD} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(kD)^i}{i!}, \quad (7)$$

если связать n с соотношением ускоряющих напряжений обеих имплантаций.

В этой связи можно сделать и более общее допущение о том, что для любых методов, характеризующихся двумя квазиустойчивыми состояниями с $\lambda = 1$, поправка на корреляционные эффекты может быть аналитически учтена посредством общей формулы

$$f^*(\Pi) = f^*(\Pi_0) e^{-kD} \alpha, \quad (8)$$

$$\alpha = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(kD)^i}{i!}$$

Здесь $\alpha \in [0; 1]$ и имеет смысл коэффициента корреляции, n и k - подгоночные параметры.

в) Релаксационные процессы, например самоотжиг тестовой структуры при комнатной температуре, обусловленный миграцией радиационных дефектов и их взаимодействием. В этом случае перед измерением обычно отжигают при $t \sim 150^\circ\text{C}$ простые дефекты [3]. Характер такого отжига для слоев с низкой дозой имплантации является сам по себе аддитивным [4] и практически не влияет на аддитивность калибровочных функций.

г) Корреляции между различными элементами структуры, связь между которыми осуществляется посредством переноса носителей заряда. Речь идет о микрорелектронных устройствах в интегральном исполнении, состоящих из блоков, каждый из которых способен накапливать дозу аддитивно, но из-за сложной функциональной зависимости измеряемого на выходе параметра $\Pi_{\text{вых}}$ и аналогичными параметрами Π , составляющих устройство подсистем функции $\Pi_{\text{вых}}(D)$ не удовлетворяет (1)-(3). В этом случае можно записать

$$\Pi_{\text{вых}}(D) = \Pi_{\text{вых}}(\Pi_1(D), \Pi_2(D), \dots),$$

а функции $\Pi_i(D)$ искать в виде (2). Обычно такие структуры не используются для измерения дозы.

Следует отметить, что условия (1-3), хотя и не дают возможности задания явного вида калибровочных зависимостей, позволяют тем не менее резко сузить область поиска, применимых подгоночных методов с единственным варьируемым параметром. Кроме того, результаты работы выходят за рамки дозиметрии ионной имплантации, и могут быть использованы для аппроксимации зависимостей при экспериментальном исследовании влияния ионного облучения на различные физические характеристики с целью их контроля регулируемого. Так, в [5], где изучалось влияние доз ионов бора ($10^{10} - 5 \times 10^{11} \text{ см}^2$) на спектральную плотность флуктуаций тока шумового фактора особо чистого кремния, приводятся зависимости указанных величин от дозы в виде $\Pi = \Pi_0 + kD^2$, что не удовлетворяет, например, (1). На самом деле при таких дозах аддитивность безусловно сохраняется и требует функцию с наличием квадратичных членов неходимо представить в соответствии с (3)

$\sqrt{\Pi} = \sqrt{\Pi_0} + kD; \Pi = \Pi_0 + \sqrt{\Pi_0} kD + k^2 D^2$.
Результаты настоящей работы могут быть также использованы для описания дозовых зависимостей других типов радиационного облучения.

3. Выводы

1. На основе принципа аддитивности копирования эффектов дозы получены базовые уравнения для описания аналитического вида калибровочных кривых методов косвенного измерения ионных доз менее 10^{11} см^2



2. Рассмотрены основные типы отклонения от принципа аддитивности; для наиболее распространенных из них предложен способ корректировки базовых функций.

3. Показано, что наиболее сильные отклонения от принципа аддитивности вероятнее всего связаны с максимально высокой неопределенностью механизма внутренних взаимодействий.

4. Результаты работы выходят за рамки проблемы дозиметрии ионной имплантации и могут быть использованы при контролируемом изменении свойств полупроводниковых материалов с помощью радиационного облучения.

Список литературы

1. Вавилов В.С. и др. Радиационные методы в твердотельной электронике. - М., Радио и связь, 1990.
2. Комаров Ф.Ф. и др. Дефекты структуры в ионно-имплантированном кремнии. - Мн., Университетское, 1990.
3. Борисова Т.М. и др. Контроль малых доз имплантации методом двойного легирования. Активируемые процессы технологии микроэлектроники. Сб. науч. тр., М., 1994.
4. Вавилов В.С. и др. Действие излучений на полупроводники. - М., Радио и связь, 1996.
5. Данилевич О.И. и др. Низкочастотный токовый шум и радиационные дефекты в ионно-имплантированном кремнии. Материалы 8-й всесоюз. конф. Взаимодействие атомных частиц с твердым телом, 1987.

CONDITIONS OF ADDITIVITY OF A RESPONSE OF EFFECT OF LOW ION DOZES ON SEMICONDUCTING STRUCTURES

V.I.Kiselev, L.I.Gurskii
Minsk Research Institute of Radiomaterials,
86, Kizhevatov str., BY-220024, Minsk, Belarus,
e-mail pb9231@belsonet.by

Because of of principle of additivity of accumulation doze of effects the conditions of a fittings to the class of functions, suitable for the analytical description of a response of a measuring structure on effect of ion dozess less than 10^{11} cm⁻² are obtained. A deviation from these conditions are connected to a development of internal correlations. The methods, various on a nature and character of such correlations are selected, but have common feature consisting that to a structure two stable additive condition are peculiar. Accordingly, in one from intermediate condition entered parameter of a degree of a nonadditivity has the greatest significance, which contacts to maximum uncertainty of the gear of internal interactions. For such methods the method of updating of an obvious kind of additive functions saving uniqueness parameter of adoption is offered. The outcomes of activity also can be used for inspected change of properties of semiconducting materials of electronic engineering with the help of of radiation irradiation of various kinds.

