

Сегрегационные особенности легирования тонких слоев кремния мышьяком в эпитаксиальных структурах для СВЧ диодов

А.В. Дерябкин, А.С. Дубкова, В.Н. Рябов, И.В. Тарасов, Н.Б. Хахин

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: В работе были получены эпитаксиальные структуры кремния методом газофазной эпитаксии при пониженных температуре и давлении. Рассмотрены сегрегационные особенности легирования тонких слоев кремния мышьяком. Определена энергия адсорбции мышьяка.

Ключевые слова: кремний, мышьяк, газофазная эпитаксия, поверхностная сегрегация, энергия адсорбции.

1. Введение

Кремниевые СВЧ диоды, работающие в мм диапазоне длин волн, предъявляют строгие требования к многослойным эпитаксиальным структурам, на которых они создаются. Тонкие слои (0,2 мкм и менее) должны различаться не только уровнем легирования, но и типом проводимости (n и p). Поскольку СВЧ диоды работают в жестких режимах, слои также должны быть бездефектными.

Поставленные задачи решаются путем применения низкотемпературного процесса газофазной эпитаксии при пониженном давлении в реакторе в диапазоне 10 – 20 кПа с использованием пиролиза моносилана. Осаждение при пониженном давлении улучшает качество растущих кристаллических слоев и позволяет снизить температуру эпитаксии благодаря подавлению газофазных реакций, снижению сорбции водорода, кислорода, галогенов и других посторонних атомов на поверхности роста, активации поверхностных реакций.

Применяя данный метод наращивания можно снизить температуру совершенного роста эпитаксиальных слоев кремния до 850 - 950 °С. Термодиффузия легирующих примесей при этом незначительная, однако преобладающее влияние на формирование профиля легирования слоев теперь оказывает эффект сегрегации примеси [1, 2, 3].

Этот эффект обусловлен особыми свойствами поверхности растущего слоя, решетка которого идеальна в глубине выращенного слоя и сильно деформирована у поверхности из-за наличия оборванных ковалентных связей. Также на поверхности, как и в газовой фазе, имеют место отдельные химические реакции. Происходит миграция легирующих и ростовых атомов или агрегатов до момента встраивания в решетку кристалла, идут важные для наращивания процессы сорбции и десорбции, как атомов кремния и легирующих примесей, так и атомов, отнимающих места для роста (водорода – газа-носителя, следов углерода, кислорода, галогенов – после предэпитаксиального травления).

Степень искажения решетки убывает с удалением от поверхности, но может достигать десятков межатомных расстояний. Искажение влияет на встраивание атомов легирующих примесей, имеющих отличные от атомов кремния атомные и ионные радиусы, соотношения ковалентных и ионных связей, присущих элементу. Большая часть примесей преимущественно накапливается в этой искаженной области кристалла. Поэтому на начальной стадии эпитаксиального роста легирующая примесь расходуется на обогащение тонкого, около 0,01 мкм, слоя. При малой толщине

приповерхностного слоя количество сегрегированных атомов примеси существенно, так как концентрация их превышает равновесную концентрацию в глубине выращенного слоя на два порядка, в зависимости от температуры роста и типа примеси.

2. Математическая модель и экспериментальные данные

Для описания легирования можно использовать математическую модель, предложенную в работе [1]. Примесь, сорбирующаяся из газовой фазы, расходуется на легирование растущего эпитаксиального слоя, формирование в приповерхностной области, повышенной по сравнению с объемом концентрации примеси, часть примеси десорбируется с поверхности. В этом случае уравнение баланса примеси в приповерхностной области растущего слоя может быть представлено в виде

$$Qdt - C_{nn} h \gamma dt = h dC_{nn} + V_p C_{об} dt, \quad (1)$$

где Q – поток атомов легирующей примеси, поступающий из газовой фазы и сорбирующийся на поверхности; Qdt – количество сорбирующейся примеси; $C_{об}$ и $C_{пп}$ – концентрация легирующей примеси в объеме растущего эпитаксиального слоя и в приповерхностной области, где проявляется эффект сегрегации; h – толщина приповерхностной области; γ – константа скорости десорбции, которая описывается функцией $\gamma = \gamma_0 \cdot \exp(-E_{адс}/kT)$ и выражает собой температурную зависимость скорости десорбции легирующих атомов с поверхности; $E_{адс}$ – энергия адсорбции примеси на поверхности; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; γ_0 – константа. С учетом этого $C_{пп} \cdot h$ – скорость десорбции примеси; $C_{пп} \cdot h \cdot \gamma \cdot dt$ – количество примеси, десорбирующееся с поверхности в газовую фазу; V_p – скорость роста эпитаксиального слоя.

С учетом соотношения $C_{пп}/C_{об} = K$, где K – коэффициент распределения примеси ($K > 1$), уравнение (1) примет вид

$$Qdt = Kh dC_{об} + (V_p + Kh\gamma)C_{об} dt. \quad (2)$$

Его решение дает

$$C_{об} = C_0 \left[1 - \exp\left(-V_p / Kh + \gamma\right)t \right] \quad (3)$$

где

$$C_0 = \frac{Q}{V_p + Kh\gamma} \quad \text{или} \quad C_0 = \frac{Q}{V_p + Kh\gamma_0 \exp(-E_{адс} / kT)}. \quad (4)$$

Выражение для концентрации примеси в эпитаксиальном слое в случае, когда нелегированный слой наращивается на легированный ($Q \cdot dt = 0$), имеет следующий вид

$$C_{об} = C_0 \exp\left(-V_p / Kh + \gamma\right)t. \quad (5)$$

Кривая автолегирования, обусловленного поверхностной концентрацией легирующей примеси, в полулогарифмическом масштабе зависимости концентрации от времени наращивания имеет линейный вид, а угол ее наклона зависит от конкретного значения многих параметров (скорость роста эпитаксиального слоя, степень сегрегации примеси на поверхности, энергия связи легирующей примеси с поверхностью, температура процесса):

$$\frac{d \ln C_{об}}{dt} = - \left[V_p / Kh + \gamma_0 \exp\left(\frac{-E_{адс}}{kT}\right) \right]. \quad (6)$$

При $\gamma \gg V_p/K \cdot h$, выражение (6) принимает вид

$$-\frac{d \ln C_{об}}{dt} = \gamma_0 \exp\left(\frac{-E_{adc}}{kT}\right). \quad (7)$$

Уравнение (7) позволяет из изменения угла наклона кривой автолегирования при вариации температуры роста определить энергию адсорбции легирующей примеси на поверхности роста.

Для определения энергии адсорбции мышьяка были изготовлены структуры $p^{++}np^+n^+n^{++}$ -типа. Образцы изготавливались при температурах роста 900°C , 950°C и 1050°C в двух режимах: при концентрации моносилана (SiH_4) в водороде 0,67% и 0,22%. После наращивания n^+ -слоя никаких действий, направленных на снижение количества примеси в приповерхностной области не проводилось. Легирование последующего слоя определялось расходом примеси из сегрегационного пика. Исследование образцов проводилось путем измерения вольт-фарадных характеристик и расчета профиля их легирования. На рисунках 1 и 2 представлены профили легирования полученных образцов (при доле SiH_4 0,67%) и графики температурной зависимости тангенса угла наклона кривой автолегирования. Рассчитаны энергии адсорбции мышьяка в режиме роста с концентрацией моносилана в водороде 0,67% – 146,7 кДж/моль, и 220 кДж/моль в режиме с 0,22% SiH_4 .

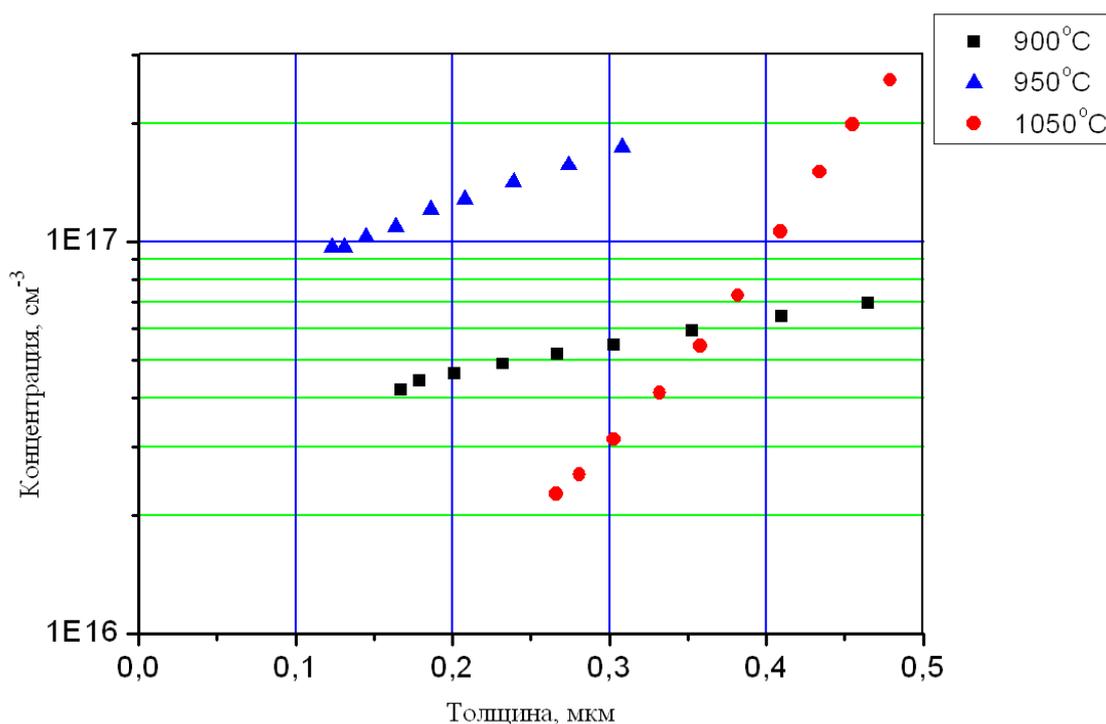


Рисунок 1. Профили легирования n -слоя структуры $p^{++}np^+n^+n^{++}$ -типа при температуре роста 900°C , 950°C и 1050°C .

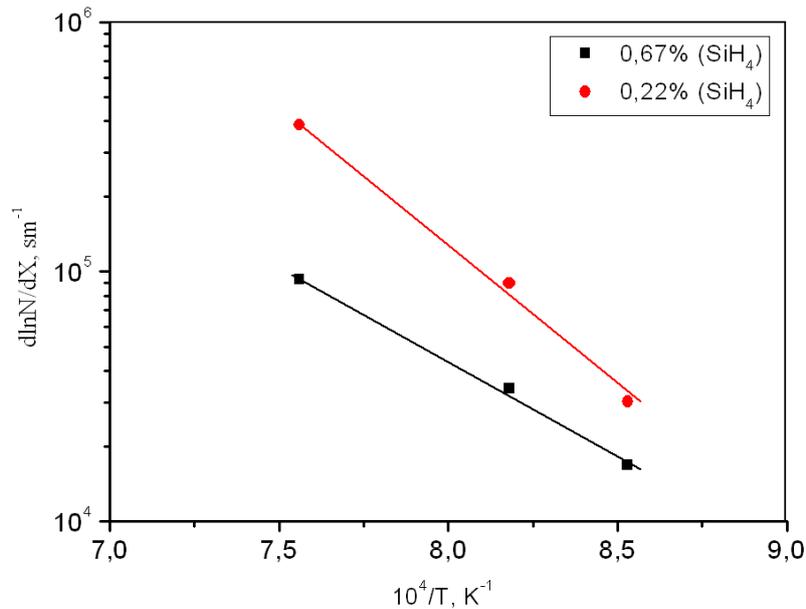


Рисунок 2. Тангенс угла наклона легирования n-слоя структуры $p^{++}np^{+}n^{++}$ -типа при температуре роста 900°C, 950°C и 1050°C.

В работе [1] в подобных условиях (0,67% SiH_4 в водороде) при легировании фосфором была получена величина энергии адсорбции – 103,2 кДж/моль.

Использование мышьяка в качестве легирующей примеси позволяет получать слои с высоким уровнем легирования более тонкими. Однако, для уменьшения влияния эффекта приповерхностной сегрегации примеси необходимо проводить предварительный запуск лигатуры перед наращиванием слоя для создания на поверхности необходимого избытка атомов примеси, и высокотемпературный отжиг после его наращивания для освобождения поверхности от сегрегированной примеси. На рисунке 3 представлен профиль распределения мышьяка в эпитаксиальной структуре кремния $p^{++}np^{+}np^{++}$ -типа (наращивание при температуре 950°C с последующим отжигом), полученный с помощью вольт-фарадных измерений.

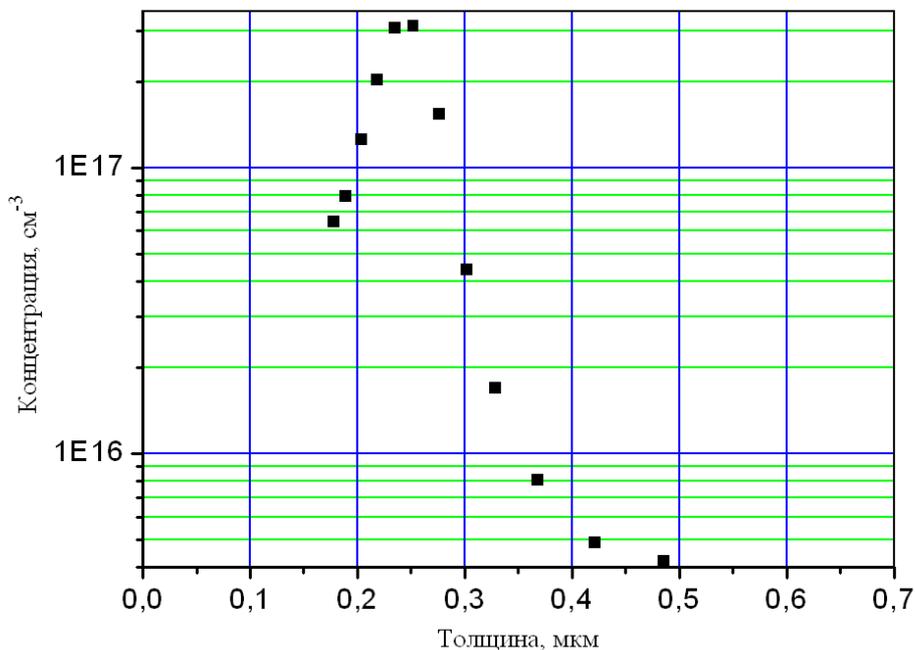


Рисунок 3. Профиль распределения мышьяка в структуре кремния $p^{++}np^{+}np^{++}$ -типа.

3. Заключение

Тонкие эпитаксиальные слои кремния n-типа с повышенным уровнем легирования относительно соседних, типа пиков Рида в структурах для ЛПД и других СВЧ приборов мм диапазона длин волн, можно получать методом газофазной эпитаксии при пониженном давлении 10 - 20 кПа и температуре 850 - 950°C в реакторе способом пиролиза моносилана. Для получения слоев с толщиной 0,05 - 0,1 мкм необходимо использовать в качестве легирующей примеси мышьяк, учитывать явление сегрегации легирующих примесей в приповерхностной области роста и использовать способы, уменьшающие ее влияние на формирование профиля легирования структур. Необходимо также продолжить исследования поверхностной сегрегации примеси.

Список литературы:

1. Никулов, В.В. Сегрегационная модель автолегирования кремния в эпитаксиальном слое / В.В. Никулов, В.Н. Власов // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-электроника. – 1988. – Вып. 10 (414). – С. 53-54.
2. Эрвье, Ю.Ю. О накоплении примеси в адсорбционном слое в процессе легирования при молекулярно-лучевой эпитаксии / Ю.Ю. Эрвье // Материалы электронной техники – 2013. – № 2. – С. 4-10.
3. Keith, H. Chung. Silicon-based epitaxy by chemical vapor deposition using novel precursor neopentasilane: dissertation candidacy for the degree of doctor of philosophy / Keith, H. Chung. – Princeton, 2010. – 149 p.