

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ МАСКИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЙ-КРЕМНИЙ ЧАСТИЦАМИ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТИПА

*Н.Л. Казанский, А.И. Колпаков, В.А. Колпаков  
Институт систем обработки изображений РАН  
Самарский государственный аэрокосмический университет*

Рассматривается система жидкий алюминий – кремний, облучаемая ионно-электронным потоком, сформированным газовым разрядом высоковольтного типа (ГРВТ) с энергией частиц до 6 кэВ. Теоретически показана возможность существования потока пустот атомного размера («вакансий») в объеме жидкой фазы алюминия (маски) при облучении его поверхности отрицательно заряженными частицами ГРВТ с энергией до 6 кэВ.

Приведены результаты экспериментальных исследований, хорошо согласующиеся с эффектом увлечения атомов кремния потоком «вакансий».

Показана возможность формирования каталитической маски для создания микрорельефа дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Средствами литографии обычный фотошаблон ДОЭ превращается в каталитическую маску на основе жидкого алюминия. Показана возможность дозированной загонки атомов полупроводника в расплав маскирующего материала путем изменения режимов облучения структуры алюминий-кремний (Al-Si) непосредственно во время проведения технологического процесса. Последующее удаление насыщенного полупроводником слоя каталитической маски приводит к образованию дифракционного микрорельефа.

## **Введение**

Изготовление дифракционных оптических элементов (ДОЭ) на кремниевых подложках можно осуществить плазмохимическим травлением (ПХТ). Однако профиль и глубина канавок получают искаженными относительно расчетных [1]. В работе [2] запатентован способ создания микрорельефа дифракционных оптических элементов, в котором на подложку наносят каталитическую маску. После этого структуру нагревают в среде транспортного газа широкоапертурным потоком излучения с длиной волны, лежащей в окне прозрачности обрабатываемого материала. При этом геометрические размеры канавок микрорельефа определяются параметрами каталитической маски.

В работе [3] описано устройство, способное формировать ионно-электронные потоки с равномерными распределениями энергии и концентрации частиц по сечению. Данное устройство позволяет изменять параметры облучения (плотность тока, энергия частиц) непосредственно в процессе формирования микрорельефа.

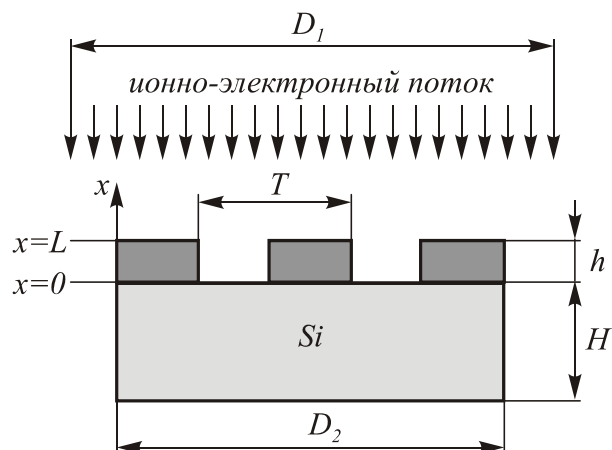
В настоящей работе предлагается использовать механизм растворения атомов кремния в материале маски, выполненной из алюминия, для управления параметрами формируемого микрорельефа ДОЭ. Это достигается посредством изменения параметров облучения поверхности структуры алюминий-кремний (Al-Si) отрицательно заряженными частицами газового разряда высоковольтного типа (ГРВТ) во время проведения технологического процесса.

## **1. Анализ механизма растворения кремния в жидком алюминии**

### 1.1. Постановка задачи и механизм возникновения вакансий

В работе [4] предложена физическая модель процесса растворения атомов кремния (Si) в распла-

ве алюминия (Al) при облучении структуры Al-Si ионно-электронным потоком (рис. 1).



*Рис. 1. Схема облучения структуры алюминий-кремний (Al-Si) ионно-электронным потоком, сформированным газоразрядным устройством высоковольтного типа*

Для получения данной структуры в настоящей работе на поверхность кремниевой подложки диаметром  $D_2=30$  мм и толщиной  $H=0,3$  мм методом термического испарения в вакууме наносился химически чистый алюминий. Последующее применение стандартных методов фотолитографии позволило сформировать на поверхности кремния маску, представляющую собой периодическую решетку с периодом  $T=12$  мкм, состоящую из полосок алюминия шириной  $b=6$  мкм и толщиной  $h=0,15-0,2$  мкм. Кроме того, для проведения металлографических исследований в работе применялись и структуры с толщиной алюминия  $h=4$  мкм. Необходимо отметить, что все последующие рассуждения имеют смысл только при  $h \ll b$ , где  $b$  – ширина штриха маски. Выполнение данного неравенства, а также действие сил поверхностного натяжения на границе раздела жидкий алю-

миний - кремний позволяют предотвратить растекание жидкого алюминия на другие области полупроводника во время облучения.

При облучении ионно-электронным потоком во взаимодействие с поверхностью алюминия вступают два сорта частиц: электроны и отрицательные ионы кислорода. Энергия, передаваемая этими частицами атому алюминия при взаимодействии с ним, определяется из выражений [5]:

для электронов

$$\Delta T_e = \frac{2 e U m_e}{M}, \quad (1)$$

для ионов кислорода

$$\Delta T_i = \frac{4 e U m_i M}{(m_i + M)^2}, \quad (2)$$

где  $M$  - масса атома алюминия;  $U$  - ускоряющее напряжение;  $m_e$  - масса электрона;  $m_i$  - масса иона кислорода.

Подставляя в (1) и (2)  $M=44,82 \cdot 10^{-27}$  кг и  $U = 3,6$  кВ, а также массы для электрона  $m_e=9,1 \cdot 10^{-31}$  кг и иона кислорода  $m_i=26,5 \cdot 10^{-27}$  кг, получим, соответственно,  $\Delta T_e=0,23$  эВ и  $\Delta T_i=3,3$  кэВ. Так как энергия активации «вакансий», т.е. полостей атомных размеров [6] в жидких металлах, лежит в диапазоне 0,6-0,7 эВ [6], что больше  $\Delta T_e$ , но меньше  $\Delta T_i$ , то ион или несколько электронов могут создавать градиент «вакансий» в приповерхностном слое жидкого алюминия. Это приводит к возникновению потока вакансий ( $j_v$ ) в направлении поверхности полупроводника.

### 1.2. Модель растворения кремния в расплаве алюминия

Известно [7], что в равновесных и однородных системах практически все вещества в расплавленном виде имеют приблизительно одинаковый коэффициент диффузии, равный  $D \approx 5 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/с. В неравновесных средах его величина определяется значениями концентрации и энергии активации «вакансий». Для оценки скорости распространения «вакансий»  $V$  коэффициент диффузии можно считать постоянным и равным  $D_v \approx 5 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/с. Так как  $V \cdot h = D_v$ , то при толщине маскирующего материала ( $h = 4$  мкм или 0,15 мкм) «вакансии» практически мгновенно достигнут поверхности раздела Al-Si. Характер изменения потока «вакансий» в объеме жидкого алюминия можно представить уравнением Фика [5]:

$$j_v = D_v \left( \frac{\partial C_v}{\partial x} \right), \quad (3)$$

где  $D_v$  – коэффициент диффузии «вакансий»;

$C_v$  – концентрация «вакансий».

Растворение кремния в алюминии осуществляется по вакансионному механизму [6], согласно которому достигшие поверхности кремния «вакансии» способствуют возникновению в направлении от по-

верхности кремния к поверхности алюминия встречного потока атомов кремния ( $j$ ).

При движении к поверхности алюминия атомы кремния будут взаимодействовать с «вакансиями», имеющими неравномерное распределение. Коэффициент диффузии кремния в этом случае будет иметь функциональную зависимость от концентрации «вакансий», и его можно записать в следующем виде:

$$D(C_v) = \left( \frac{C_v}{C_0} \right) D_v, \quad (4)$$

где  $D(C_v)$  - коэффициент диффузии кремния в расплавленном алюминии;

$C_0$  - максимальная концентрация атомов кремния в расплаве алюминия.

При этом условии встречный поток атомов кремния, направленный к поверхности алюминия, можно описать выражением:

$$j = D(C_v) \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right), \quad (5)$$

где  $C$  – концентрация атомов кремния в расплаве.

Подставив (4) в (5), а затем (3) и (5) в уравнение непрерывности вида:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\text{div}(\vec{j}), \quad (6)$$

получим систему уравнений, описывающих процесс растворения кремния в алюминии при наличии потока «вакансий»:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_v}{\partial t} &= D_v \frac{\partial^2 C_v}{\partial x^2} \\ \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{D_v}{C_0} \frac{\partial}{\partial x} \left( C_v \frac{\partial C}{\partial x} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Система уравнений (7) учитывает экспериментально подтвержденное отсутствие обратного процесса (растворения атомов алюминия в кремнии), то есть постоянное наличие межфазной границы алюминий-кремний в процессе облучения. В то же время экспериментальные исследования показывают сохранение границы алюминий-кремний на прежнем уровне ( $x=0$ , см. рис. 1) до момента перехода алюминия в жидкое состояние. Начиная с этого момента и до полного прекращения облучения, происходит послойное растворение кремния в жидком алюминии. В результате слои кремния заменяются слоями алюминия, насыщенными атомами полупроводника, следствием чего является смещение положения уровня  $x=0$  на некоторую величину  $h_n$ . Экспериментально установлено, что граница  $x=L$  также смещается на величину  $h_n$  в направлении поверхности полупроводника. Действительно, как следует из рис.2 (а, б, в), высота маскирующего материала до облучения равнялась толщине напыленного слоя алюминия, а после облучения - нулю. Однако при удалении насыщенного полупроводником слоя каталитической маски на поверхности подложки оставались сформир-

рованные канавки высотой  $h_n$ , равной толщине напыленного слоя алюминия (см. рис.2 а, в).

Таким образом, смещение положения уровней  $x=0$ ,  $x=L$  в направлении полупроводника безусловно существует, но с достаточной степенью точности можно считать, что величина этого смещения для обеих границ остается одинаковой и равной  $h_n$  в течение всего времени облучения. Растворение кремния в жидком алюминии по вакансионному механизму предполагает наличие постоянных источников: «вакансий» на поверхности расплава ( $x=L$ ) и атомов полупроводника на границе  $x=0$ . Источником «вакансий» может служить либо тепловое поле, либо, как уже отмечалось ранее, ионно-электронный поток. В любом случае началу процесса растворения предшествует образование «вакансий» на поверхности расплава, свободного от примесных атомов полупроводника. Однако создать градиент «вакансий» на границе  $x=0$  невозможно ввиду многократного преобладания поверхностных атомов кремния над числом «вакансий», достигших поверхности полупроводника. В результате происходит поглощение «вакансий» поверхностными атомами кремния. Насыщение расплава атомами кремния идет в направлении от поверхности полупроводника в сторону поверхности расплава. Концентрация атомов кремния в расплаве определяется величиной его предельной растворимости [8], поэтому создать градиент атомов кремния на границе  $x=L$  также не пред-

ставляется возможным. С учетом всех сделанных выше рассуждений, граничные и начальные условия для системы уравнений (7) имеют вид:

$$\begin{aligned} C_v|_{x=L} &= C_{v0}; \quad \frac{\partial C_v}{\partial x}|_{x=0} = 0; \\ C_v|_{t=0} &= \begin{cases} C_{v0} & \text{при } x=L \\ 0 & \text{при } 0 \leq x < L \end{cases}; \\ C|_{x=0} &= C_0; \\ \frac{\partial C}{\partial x}|_{x=L} &= 0; \quad C|_{t=0} = \begin{cases} C_0 & \text{при } x=0 \\ 0 & \text{при } 0 < x \leq L. \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

Первое (слева – направо построчно) и четвертое граничные условия (8) говорят о наличии постоянных источников: «вакансий» на поверхности расплава и атомов полупроводника на границе  $x=0$ . Второе и пятое условия второго рода показывают, что концентрации «вакансий» на границе  $x=0$  и атомов полупроводника на  $x=L$  не меняются, то есть градиент как «вакансий», так и атомов полупроводника на указанных границах равен нулю. Третье и шестое начальные условия подчеркивают, что в объеме расплава в момент времени облучения  $t=0$  отсутствуют как примесные атомы полупроводника, так и «вакансии».

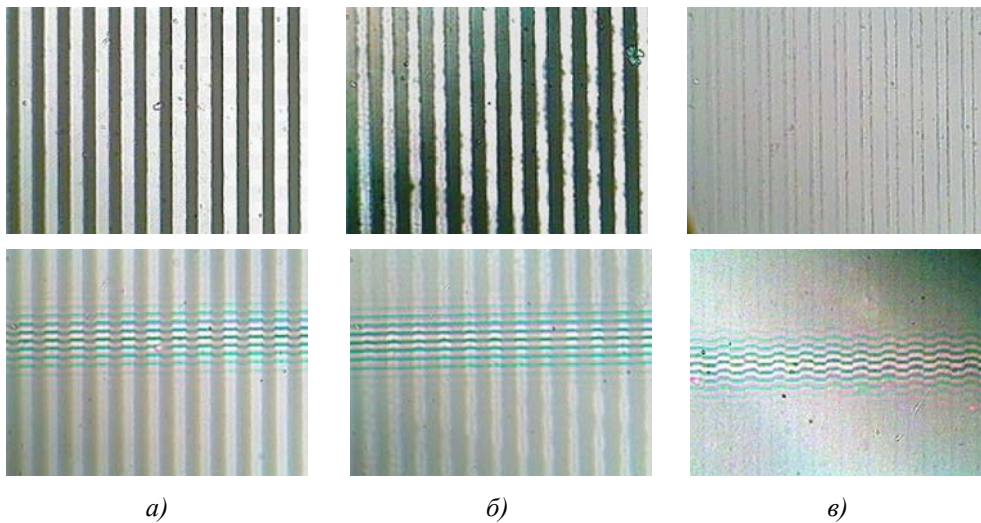


Рис. 2. Виды (верхний ряд) и соответствующие им интерферограммы (нижний ряд) структур алюминий-кремний: а)- до облучения; б) – после облучения и в)- поверхность кремния после снятия каталитической маски

### 1.3. Консервативная разностная схема для уравнений диффузии

Запишем нелинейное однородное уравнение диффузии в виде [9]:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(x) \frac{\partial y}{\partial x} \right], \quad (9)$$

где  $K(x)$  - коэффициент диффузии.

Введем равномерную сетку,

$$\omega_{tn} = \{ t^i = i\tau, x_n = nh, i = \overline{0, N_1}, n = \overline{1, N_2} \},$$

на которой запишем разностные уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau} (y_n^{i+1} - y_n^i) &= \\ = \frac{1}{h^2} \left[ x_{n+\frac{1}{2}} (y_{n+1}^{i+1} - y_n^{i+1}) - x_{n-\frac{1}{2}} (y_n^{i+1} - y_{n-1}^{i+1}) \right], \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$x_{n-\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} [K(x_n) + K(x_{n+1})],$$

$$x_{n-\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} [K(x_{n-1}) + K(x_n)].$$

Данная схема получена заменой дифференциальной задачи вариационной: она консервативна, следовательно, абсолютно устойчива [10]. Порядок аппроксимации схемы: первый – по времени, второй – по пространству [10].

Аналогично построим разностную схему для уравнений системы (7):

$$\frac{1}{\tau} (C_{vn}^{i+1} - C_{vn}^i) = \frac{D_v}{h^2} [C_{vn+1}^{i+1} - 2C_{vn}^{i+1} + C_{vn-1}^{i+1}] \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau} (C_n^{i+1} - C_n^i) &= \\ &= \frac{1}{2} \frac{D_v}{C_0 h^2} [(C_{vn+1}^{i+1} + C_{vn}^{i+1})(C_{n+1}^{i+1} - C_n^{i+1}) - \\ &- (C_{vn}^{i+1} + C_{vn-1}^{i+1})(C_n^{i+1} - C_{n-1}^{i+1})] \end{aligned}$$

Для данной системы уравнений справедливы следующие разностные аппроксимации граничных и начальных условий, полученные из (8):

$$C_{v_2}^i = C_{v_1}^i, \quad i = \overline{0, N_1};$$

$$C_{v_{N_2}}^i = C_{v_0}, \quad i = \overline{0, N_1};$$

$$C_{N_2-1}^i = C_{N_2}^i, \quad i = \overline{0, N_1};$$

$$C_1^i = C_0, \quad i = \overline{0, N_1};$$

$$C_{vn}^0 = \begin{cases} C_{v_0}, & n = N_2, \\ 0, & 1 \leq n < N_2; \end{cases}$$

$$C_n^0 = \begin{cases} C, & n = 1, \\ 0, & 1 < n \leq N_2. \end{cases} \quad (12)$$

#### 1.4. Результаты разностного решения смешанной задачи

Решение разностных уравнений (11) осуществлено методом прогонки [11]. Результаты решения приведены на рис.3 (а, б, в).

Аналогичные результаты можно получить, если предположить, что в расплаве существует некоторый градиент «вакансий» ( $A$ ) и его распределение по сечению расплава описывается функцией  $C_v = Ax + B$ . Это справедливо при малых значениях градиента ( $A$ ), когда функция  $erf$ , описывающая концентрационные профили [5], хорошо аппроксимируется прямой линией на достаточно коротких отрезках кривой  $C = f(x, t)$ . В нашем случае это условие выполняется, так как создать значительные градиенты температуры в жидком алюминии, а следовательно, и «вакансий» в расплавах на длине 3-4 мкм

практически невозможно: разница в концентрации «вакансий» у поверхности алюминия ( $x=L$ ) и поверхности кремния ( $x=0$ , см. рис.1) составляет менее одного порядка.

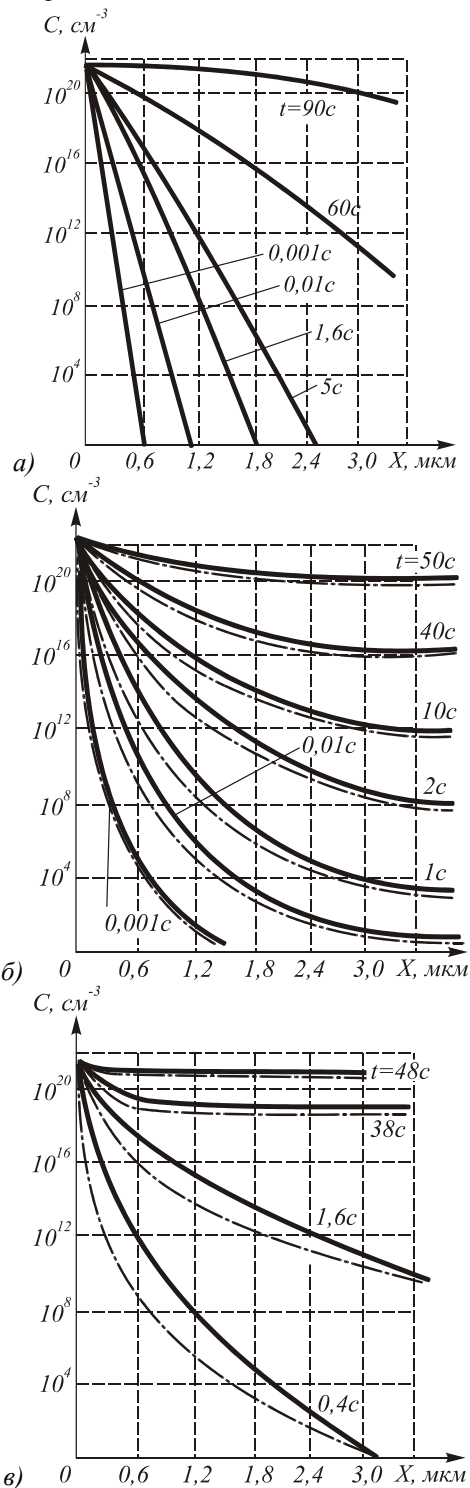


Рис. 3. Распределение концентрации атомов кремния по сечению расплава алюминия: а)  $C_{v0} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$  ( $A=0$ ); б)  $C_{v0} = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  ( $A=2 \cdot 10^{18}$ ); в)  $C_{v0} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  ( $A=4 \cdot 10^{18}$ ). Для всех случаев  $D_v = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$  (непрерывные линии описывают решения системы уравнений (7); штрих-пунктирные - решения уравнения (14))

Тогда коэффициент диффузии атомов полупроводника в расплаве будет иметь вид:

$$D(C_v) = \frac{Ax + B}{C_0} \cdot 5 \cdot 10^{-4}. \quad (13)$$

Произведя подстановку этого выражения во второе уравнение (7), получим выражение, описывающее изменение концентрации атомов полупроводника в расплаве:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[ A \frac{\partial C}{\partial x} + (Ax + B) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right] \cdot \frac{5 \cdot 10^{-4}}{C_0}. \quad (14)$$

Решение (14) численным методом при начальных и граничных условиях (8) представлено на рис.3 (а, б, в) в виде зависимостей, характеризующих распределение концентрации атомов кремния по сечению расплава алюминия.

### 1.5. Анализ полученных численных результатов

При отсутствии потока «вакансий», наблюдаемого в случае  $C_{v0} = C'_{v0} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , где  $C'_{v0}$  - концентрация «вакансий» на поверхности расплава при действии теплового поля, атомы полупроводника будут иметь равные возможности для перемещения в расплаве в любом направлении, то есть этот процесс адекватен диффузии в тепловом поле. Распределение концентрации атомов кремния по сечению расплава в этом случае описывается уравнением Фика:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (15)$$

Это означает, что процесс диффузии в расплаве определяется только величиной  $\partial C / \partial x$  и зависимости (см. рис. 3 а) полностью совпадают с аналогичными кривыми, описывающими распределение атомов кремния при проведении процесса диффузии в тепловом поле [12].

Возникновение потока «вакансий» ( $C_{v0} > C'_{v0}$ ) приводит к образованию в расплаве их градиента. Процессы диффузии в этом случае будут описываться уже системой уравнений (7) и выражением (14). Распределения концентраций атомов полупроводника в расплаве, полученные из решения этих уравнений, представлены на рис.3 (б, в). Анализ зависимостей, изображенных на рис.3 (б, в), показывает, что большая крутизна на начальном участке кривых свидетельствует о замедлении отвода атомов полупроводника от его поверхности. Это обусловлено увлечением атомов полупроводника встречным потоком «вакансий» [4], когда, каждый атом Si испытывает на себе действие нескольких «вакансий». Причем, как видно из рис. 3(б), наиболее сильно действие этого механизма проявляется при малых временах облучения ( $t < 0,1$  с), когда в расплаве отсутствует равновесное состояние, и градиент концентрации «вакансий» существует во всем его объеме. С ростом времени облучения ( $t > 0,1$  с) в расплаве начинает устанавливаться равновесное состояние, и влияние на стимуляцию диффузии усиливается. Как видно из рис. 3(б, в), значительное ускорение

диффузии наблюдается уже при  $t > 1$  с. Другими словами, наряду с процессом увлечения действует и процесс стимуляции диффузии примесных атомов из-за повышенной концентрации «вакансий». Именно стимуляцией диффузии можно объяснить уменьшение времени насыщения расплава атомами Si с  $t = 90$  с (рис.3 а) до  $t = 4,8$  с (рис.3 в). Характерной чертой кривой насыщения является некоторое снижение величины  $C$  в области поверхности полупроводника (см. рис 3 б, в). Это, по-видимому, можно объяснить тем, что величина предельной растворимости полупроводника в расплаве всегда меньше значения его поверхностной концентрации. В противном случае расплав бы прекратил свое существование.

## 2. Анализ экспериментальных данных

Для подтверждения стимуляции диффузии атомов кремния в жидкой фазе алюминия проводился эксперимент, целью которого являлось сравнение глубин легирования алюминия в кремний при действии на структуру Al-Si чисто теплового поля и ионно-электронного облучения. Для этого на обеих поверхностях кремниевой пластины формировался слой алюминия ( $h = 4$  мкм). Верхняя сторона структуры Al-Si-Al подвергалась облучению ионно-электронным потоком с током  $I = 6,9$  мА и ускоряющим напряжением  $U = 3,8$  кВ в течение  $t = 2$  с, в то время как нижняя действовала только тепловым полем. Измерение глубин легирования осуществлялось металлографическим способом путем применения метода косого шлифа ( $\alpha = 7^\circ$ ) [5]. Окрашивание легированных слоев происходило в растворе, состоящем из смеси 0,05-0,1% азотной (70%-ой) и (48%-ой) плавиковой кислот. Для получения изображения косого шлифа использовался оптический микроскоп МИИ-4. Вид косого шлифа представлен на рис. 4.

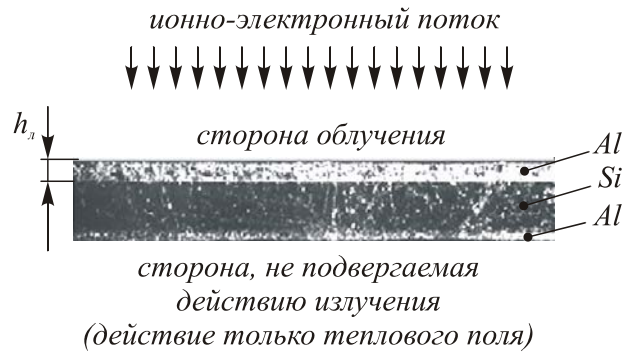


Рис. 4. Косой шлиф микроструктуры алюминий-кремний-алюминий

Зона легирования со стороны облучения (верхняя часть на рис. 4 высотой  $h_n$ ) практически в три раза превышает зону легирования поверхности кремния, не подвергавшейся действию облучения, хотя обе стороны находились практически при одной и той же температуре, равной 1123 К. Таким образом, стимуляция диффузии при ионно-электронном облучении действительно существует. В этом случае (как показал анализ зависимостей, представленных на рис.3 (б, в), варьированием ре-

жимов облучения достигается дозированное изменение концентрации атомов кремния в расплаве, а, следовательно, и глубины легирования ( $h_n$ ) маскирующего материала в приповерхностную область полупроводника, т.е. в случае формирования микрорельефа ДОО его глубина будет определяться величиной  $h_n$  (см. рис. 5).

По итогам исследований была поставлена задача: сформировать на поверхности кремниевой подложки с применением каталитической маски дифракционный микрорельеф высотой  $h_n=0,2$  мкм и периодом  $T=12$  мкм. Поставленная задача решалась путем облучения представленной на рис. 1 структуры ионно-электронным потоком, сформированным ГРВТ с током разряда  $I=70$  мА и ускоряющим напряжением  $U=1$  кВ. Время облучения составило  $t=1$  мин при толщине маскирующего слоя Al  $h=0,2$  мкм. Значения тока разряда и ускоряющего напряжения выбирались таким образом, чтобы обеспечить нагрев структуры алюминий-кремний до температуры, достаточной для перехода алюминия из твердого состояния в жидкое. Учитывалось также и то, что ускоряющее напряжение не должно превышать критического значения, при котором энергии отрицательных ионов кислорода хватало бы для физического распыления кремния [13]. После облучения насыщенный полупроводником слой алюминия удалялся в травителе «Царская водка» [4], при этом на поверхности подложки оставался сформированный дифракционный микрорельеф (см. рис. 6).

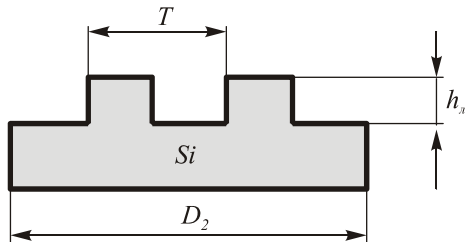


Рис. 5. Вид микрорельефа на поверхности кремниевой подложки, полученный в результате облучения структуры Al-Si частицами газового разряда высоковольтного типа (канавки образованы в области структуры Al-Si)

Как видно из рис. 6, крутизна фронта канавок близка к нормали к поверхности полупроводниковой подложки, а параметры микрорельефа соответствуют заданным. Некоторое отклонение от нормали, по-видимому, можно объяснить тем, что при взаимодействии «вакансий» с формируемой поверхностью профиля они поглощаются ею, в результате чего происходит уменьшение их концентрации, а, следовательно, и незначительное уменьшение ширины дна профиля дифракционного микрорельефа.

#### Выводы

1. Приведена физико-математическая модель, объясняющая механизм растворения атомов кремния в расплаве алюминия при облучении его ионно-электронным потоком.

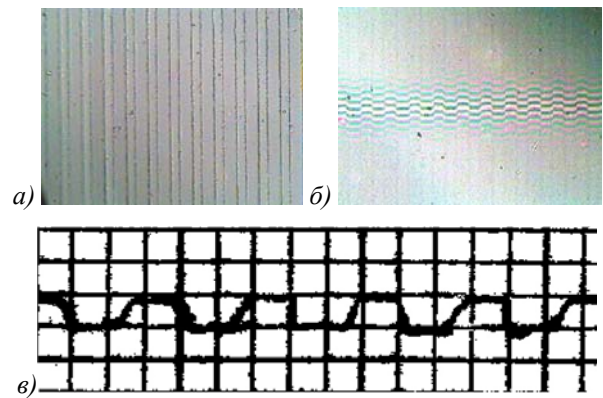


Рис. 6. Микрорельеф, полученный в результате облучения структуры Al-Si частицами газового разряда высоковольтного типа (канавки образованы в области структуры Al-Si): а) - вид микрорельефа; б) - интерферограмма микрорельефа; в) - профилограмма микрорельефа. Увеличение по осям:  $x-x1250$ ,  $y-y25000$

2. Зависимости, полученные согласно этой модели, показывают, что параметры режимов облучения и концентрация атомов кремния в материале маски имеют жесткую зависимость.

3. Установлено, что изменением электрических параметров и длительности облучения ионно-электронным потоком расплава можно как замедлять, так и ускорять процессы диффузии примесных атомов в жидком алюминии, то есть управлять высотой микрорельефа ДОО.

4. Проведенный анализ позволил оптимизировать процессы легирования поверхности кремния пленками алюминия и создания дифракционного микрорельефа на поверхности кремния.

5. Представляется целесообразным использование предлагаемого подхода при формировании микрорельефа на других материалах с соответствующим значением максимально возможной концентрации атомов материала в расплаве ( $C_0$ ).

#### Благодарность

Авторы выражают благодарность к.ф.-м.н. Д.Л. Головашкину за эффективные и полезные консультации при обсуждении критериев устойчивости разностных схем.

#### Литература

1. Лукичев В.Ф., Юнкин В.А. Масштабирование скорости травления и подобие профилей при плазмохимическом травлении // Микроэлектроника. Т. 27.1998. №3.
2. Способ изготовления дифракционных оптических элементов на алмазных и алмазоподобных пленках / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, В.А. Сойфер // Решение от 25 июня 2002 года о выдаче патента на изобретение по заявке № 2001108328/12(008621) от 27.03.2001.
3. Комов А.Н, Колпаков А.И., Бондарева Н.И., Захаренко В.В. Электронно-лучевая установка для

- пайки элементов полупроводниковых приборов // ПТЭ. 1984. №5.
4. Колпаков В.А., Колпаков А.И. Исследование эффекта увлечения атомов кремния «вакансиями», возникающими в расплаве алюминия при облучении его поверхности ионно-электронным потоком // Письма в ЖТФ. Т.25. 1999. Вып.15.
  5. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов // М.: Высшая школа, 1974.
  6. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей // Л.: Наука, 1975.
  7. Юдин В.В. Микролегирование кремния с помощью электронно-лучевого нагрева // Электронная обработка материалов. 1977. № 3 (33).
  8. Маслов А.А. Технология и конструкции полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1970.
  9. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики // М.: Наука, 1972.
  10. Марчук Г.И., Шайдулов В.В. Повышение точности решений разностных схем // М.: Наука, 1979.
  11. Самарский А.А. Теория разностных схем // М.: Наука, 1977.
  12. Болтакс Б.И. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках // Л.: Наука, 1972. 379 с.
  13. Колпаков В.А. Моделирование процесса травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа // Микроэлектроника, 2002, т.13, N 6, с.431-440.