

# 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.

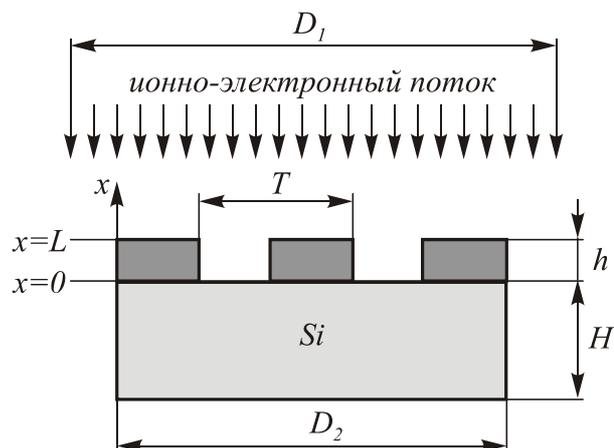
В настоящей работе предлагается использовать механизм растворения атомов кремния в материале маски, выполненной из алюминия, для управления параметрами формируемого микрорельефа ДОЭ. Это достигается посредством изменения параметров облучения поверхности структуры алюминий-кремний (Al-Si) отрицательно 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».

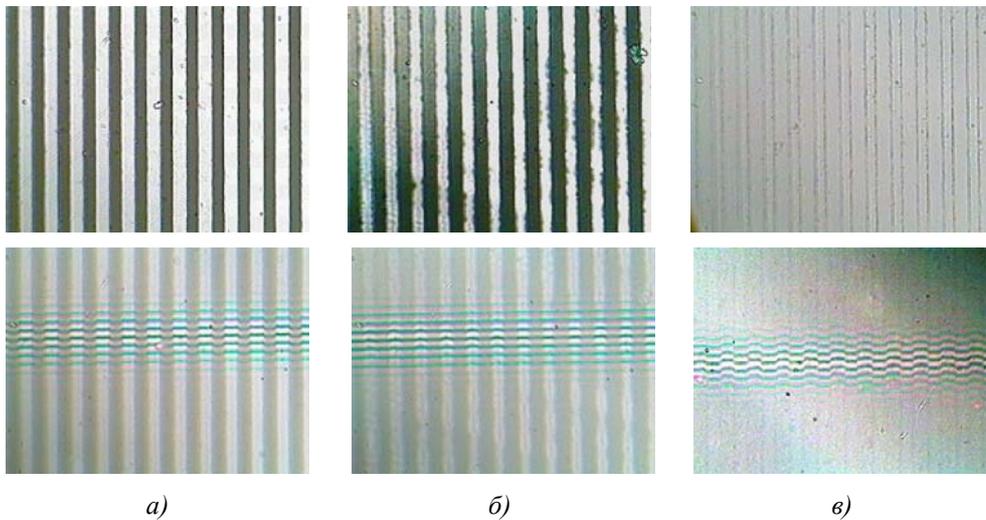


Рис. 2. Виды (верхний ряд) и соответствующие им интерферограммы (нижний ряд) структур алюминий-кремний: а)- до облучения; б) – после облучения и в)- поверхность кремния после снятия каталитической маски

### 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.

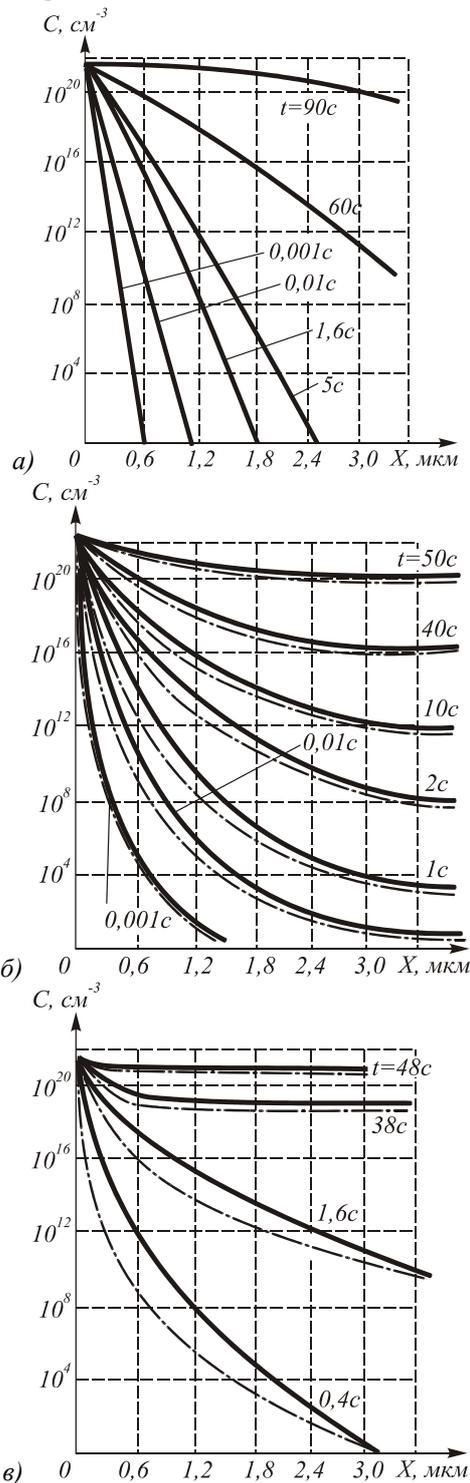


Рис. 3. Распределение концентрации атомов кремния по сечению расплава алюминия: а)  $C_{v0} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$  ( $A=0$ ); б)  $C_{v0} = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  ( $A=2 \cdot 10^{18}$ ); в)  $C_{v0} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  ( $A=4 \cdot 10^{18}$ ). Для всех случаев  $D_v = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$  (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 зависимостью (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 действию только теплового поля. Измерение глубин легирования осуществлялось металлографическим способом путем применения метода косоугольного 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 косоугольного шлифа использовался оптический микроскоп МИИ-4. Вид косоугольного шлифа представлен на рис. 4.

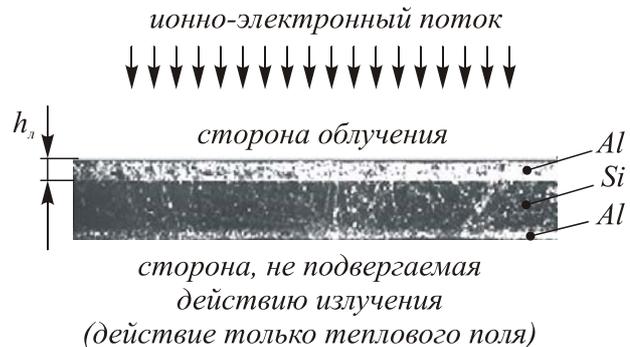


Рис. 4. Косой шлиф микроструктуры алюминий-кремний-алюминий

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).

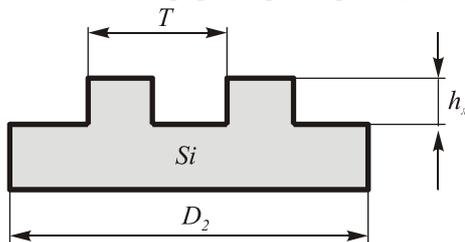


Рис. 5. Вид микрорельефа на поверхности кремниевой подложки, полученный в результате облучения структуры Al-Si частицами газового разряда высоковольтного типа (канавки образованы в области структуры Al-Si)

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.

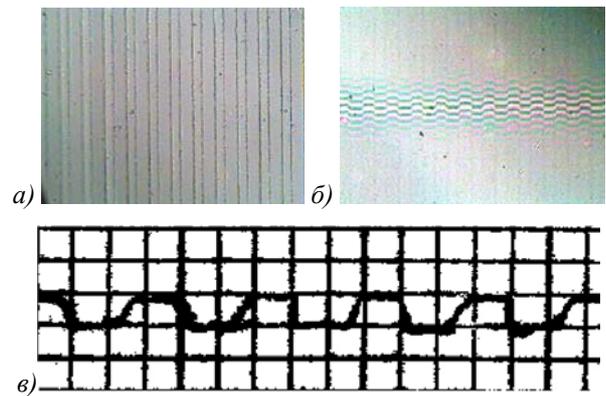


Рис. 6. Микрорельеф, полученный в результате облучения структуры Al-Si частицами газового разряда высоковольтного типа (канавки образованы в области структуры Al-Si): а) - вид микрорельефа; б) - интерферограмма микрорельефа; в) - профилограмма микрорельефа. Увеличение по осям:  $x-x1250$ ,  $y-y2500$

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.

# Studies on a mechanism of catalytic mask generation in irradiation of an Al-Si structure with high-voltage gas-discharge particles

N.L. Kazanskiy<sup>1,2</sup>, A.I. Kolpakov<sup>2</sup>, V.A. Kolpakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Image Processing Systems Institute of RAS

<sup>2</sup> Samara State Aerospace University

## Abstract

The article considers a liquid aluminum-silicon system, irradiated by an ion-electron flow generated by a high-voltage gas discharge (HVGD) with a particle energy of up to 6 keV. The work illustrates theoretically that a flux of atomic-sized voids ("vacancies") can exist in the liquid phase of aluminum (mask) when its surface is irradiated with negatively charged HVGD particles with the energy up to 6 keV. The results of experimental studies are presented, and they are in good agreement with the effect of dragging the silicon atoms by the flow of "vacancies". The feasibility of forming a catalytic mask for creating a microrelief of diffractive optical elements (DOEs) is shown. By means of lithography, a standard DOE photomask is transformed into a catalytic mask on the basis of liquid aluminum. The article shows the possibility of dosed predeposition of semiconductor atoms into the melted masking material by changing the modes of irradiation of the aluminum-silicon (Al-Si) structure immediately during the technological process. Subsequent removal of the semiconductor-saturated catalyst mask layer results in the formation of a diffractive microrelief.

**Keywords:** catalytic mask, Al-Si structure, gas discharge particle, HVGD, negatively charged particle, DOE, diffractive microrelief.

**Citation:** Kazanskiy NL, Kolpakov AI, Kolpakov VA. Studies on a mechanism of catalytic mask generation in irradiation of an Al-Si structure with high-voltage gas-discharge particles. *Computer Optics* 2002; 24: 84 - 90.

## References

- [1] Lukichev VF, Yunkin VA. Etch rate scaling and profile similarity upon plasmochemical etching [In Russian]. *Microelectronika* 1998; 27(3): 229-239.
- [2] Volkov AV, Kazanskiy NL, Moiseev OY, Soifer VA. A method for the manufacture of diffractive optical elements in diamond and diamond-like films. Decision to grant a Patent for Invention dated 25.06.2002 based on the application 2001108328/12(008621) of 27.03.2001.
- [3] Komov AN, Kolpakov AI, Bondareva NI, Zakharenko VV. Electron-beam unit for soldering semiconductor devices [In Russian]. *Instruments and Experimental Techniques* 1984; 5: 218-220.
- [4] Kolpakov VA, Kolpakov AI. Investigation of the entrainment of silicon atoms by "vacancies" formed in an aluminum melt when its surface is exposed to an ion-electron flux. *Tech Phys Lett* 1999; 25(15): 618-620.
- [5] Kurnosov AI, Yudin VV. Technology of production of semiconductor devices and integrated microcircuits [In Russian]. Moscow: "Vysshaya Shkola" Publisher; 1974.
- [6] Frenkel J. Kinetic theory of liquids. Dover Publications; 1955.
- [7] Yudin VV. Electron-beam microalloying of silicon [In Russian]. *Electronic Material Processing* 1977; 3(33): 27-30.
- [8] Maslov AA. Technology and design of semiconductor devices [In Russian]. Moscow: "Energiya" Publisher; 1970.
- [9] Tikhonov AN, Samarskii AA. Equations of mathematical physics. Macmillan Co; 1963.
- [10] Marchuk GI, Shaidurov VV. Increasing the accuracy of solutions of difference schemes [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher; 1979.
- [11] Samarskii AA. The theory of difference schemes. New York, Basel: Marcel Dekker Inc; 2001.
- [12] Boltax BI. Diffusion and point defects in semiconductors [In Russian]. Leningrad: "Nauka" Publisher; 1972.
- [13] Kolpakov VA. Simulation of technological process of silicon dioxide etching in high-voltage gas discharge plasma [In Russian]. *Microelectronika* 2002; 13(6): 431-440.