

01;05;06

©1994 г.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ БОКОВЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ В МНОГОСЛОЙНЫЕ МИШЕНИ

*Ф.Ф. Комаров, И.Е. Мозолевский, В.П. Рогач*

Белорусский государственный университет,  
220080, Минск  
(Поступило в Редакцию 5 ноября 1993 г.  
В окончательной редакции 29 апреля 1994 г.)

С увеличением степени интеграции в современной технологии производства интегральных схем точное моделирование двумерных эффектов становится все более актуальным. В настоящей работе предлагается эффективное решение указанной проблемы с помощью программного комплекса двумерного моделирования локальной ионной имплантации в многослойные мишени, основанного на численном решении уравнения Больцмана.

Имплантация ионов в многослойные мишени находит все более широкое применение в современных технологиях СБИС (сверхбольшая интегральная схема), например при наличии пассивирующего слоя для предотвращения загрязнения подложки, рассеивающего слоя или слоя, регулирующего глубину залегания внедренных ионов, и т.д. При моделировании ионной имплантации в многослойные мишени аналитические методы, основанные на уравнениях относительно моментов функции распределения либо свертывании одномерных профилей [1-4], оказываются неприемлемыми в случае неоднородных мишеней или областей сложной геометрии. В настоящее время широко известны два метода моделирования имплантации в многослойные образцы, которые полностью учитывают теоретические представления о процессах внедрения ускоренных частиц в твердое тело. Это метод Монте-Карло [5] и подход, связанный с решением уравнения переноса Больцмана [6-8]. Однако численное моделирование методом Монте-Карло требует слишком больших затрат машинного времени и неприемлемо при моделировании ионной имплантации в областях сложной геометрии, а известные программные комплексы численного решения уравнения Больцмана рассчитаны на мощные суперЭВМ. В настоящей работе предложен алгоритм двумерного моделирования ионной имплантации, легко реализуемый на стандартной IBM PC/AT-386 и позволяющий с

высокой точностью вычислять пространственные распределения легирующей примеси и выделенной энергии при локальной ионной имплантации в многослойные мишени.

Предположим, что область моделирования  $D$  есть прямоугольник, состоящий из  $n$  прямоугольных слоев ( $D = \bigcup_{i=1}^n D_i$ ,  $i = 1$ ) с границей  $\partial D = \Gamma_0 \cup \Gamma_1$ , часть  $\Gamma_1$  которой бомбардируется потоком ионов. Тогда граничная задача, описывающая распределение потока ионов в мишени  $D$ , имеет вид [8]

$$\cos \varphi \sin \vartheta \frac{\partial U}{\partial x} + \sin \varphi \sin \vartheta \frac{\partial U}{\partial y} = I(U), \quad (x, y) \in D; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} U|_{\Gamma_1} &= U_1(x, y, E, \varphi, \vartheta), & n_1 \cos \varphi + n_2 \sin \varphi < 0; \\ U|_{\Gamma_0} &= 0, & n_1 \cos \varphi + n_2 \sin \varphi < 0; \end{aligned} \quad (2)$$

$$U|_{\Gamma_{i-0}} = U|_{\Gamma_{i+0}}, \quad i = 2, 3, \dots, n-1. \quad (3)$$

Здесь функцию распределения потока ионов  $U(x, y, E, \varphi, \vartheta)$  можно интерпретировать как количество ионов с энергией  $E$ , имеющих направление движения с полярным углом  $\varphi$ , азимутальным углом  $\vartheta$  и находящиеся в окрестности точки  $(x, y)$  мишени  $D$ ;  $I(U)$  — интеграл столкновений;  $n = (n_1, n_2)$  — внешняя нормаль к границе  $\partial D$ ;  $\Gamma_i = D_{i+1} \cap D_i$  — границы раздела слоев мишени;  $U|_{\Gamma_{i-0}}$ ,  $U|_{\Gamma_{i+0}}$  — односторонние пределы потока с разных сторон поверхности  $\Gamma_i$ ;  $U_1$  — заданная функция, описывающая условия имплантации. В частности, при имплантации через окно  $\Omega$  плоскопараллельным моноэнергетическим пучком с энергией  $E_0$  и направлением  $(\varphi_0, \vartheta_0)$  функция  $U_1$  имеет вид

$$U_1(x, y, E, \varphi, \vartheta) = N_{\square} \chi(x, y) \delta(E - E_0) \delta(\varphi - \varphi_0) \delta(\vartheta - \vartheta_0),$$

$$\text{где } \chi(x, y) = \delta(x) \chi(y), \quad \text{а}$$

$$\chi(y) = \begin{cases} 1, & \text{если } y \in \Omega, \\ 0, & \text{если } y \notin \Omega. \end{cases}$$

В теории ионной имплантации интеграл столкновений представляется следующим образом:

$$I(U) = I_n(U) + I_e(U),$$

где  $I_n(U)$  описывает ядерные и  $I_e(U)$  — электронные взаимодействия.

В настоящей работе для описания ядерного рассеяния использован универсальный потенциал [5], а электронное торможение описывалось формулами Линхарда-Шарфа и Бете-Блоха в соответствующих интервалах энергий.

Граничная задача (1)–(3) решалась путем частичной дискретизации по энергии и углам методом Галеркина с последующим численным интегрированием полученной системы дифференциальных уравнений с частными производными с кусочно-постоянными коэффициентами [8].

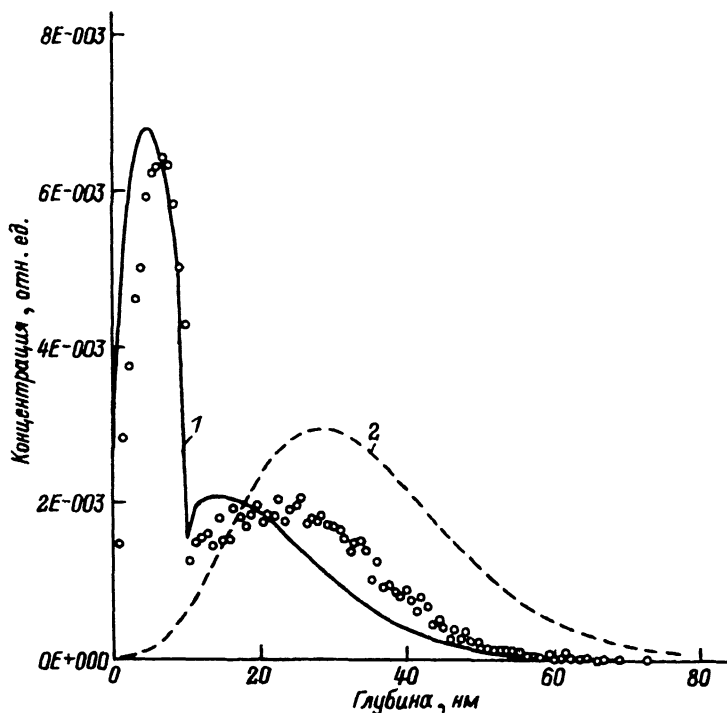


Рис. 1. Распределения остановившихся ионов по центру окна при имплантации с маскирующим слоем (1) и без (2) и результаты вычислений программы TRIM при имплантации  $Sb^+$  с энергией 50 кэВ под углом  $90^\circ$  к поверхности мишени.

Для исследования боковых эффектов было проведено моделирование ионной имплантации ионов сурьмы  $Sb^+$  с энергией 50 кэВ в кремниевую подложку и в кремний, покрытый слоем тантала толщиной 10 нм. Область моделирования имела размеры  $100 \times 300$  нм и имплантация проводилась через достаточно широкое окно (160 нм). На рис. 1 приведены графики распределения имплантированной примеси, полученные по центру окна в результате моделирования, а также рассчитанный по методу Монте-Карло профиль. Как видно из рисунка, результаты двумерного моделирования хорошо согласуются с расчетами по программе TRIM, что свидетельствует об адекватности двумерной модели. Приведенный на том же рисунке профиль распределения примеси, имплантированной в чистый кремний, сдвинут в глубину мишени и убывает медленнее, чем профиль ионов, имплантированных сквозь слой тантала, что очевидно объясняется более высокой тормозной способностью танталового слоя.

На рис. 2, а и б приведено двумерное распределение остановившихся ионов  $Sb$ , имплантированных сквозь слой тантала, и распределение энергии, выделенной в ядерных столкновениях. Как показали расчеты, в слое тантала остановилось 47% имплантированной примеси и выделилось 42% от всей энергии. Из приведенных рисунков видно, что боковое распределение имплантированной примеси под маску превосходит боковое распределение выделенной энергии.

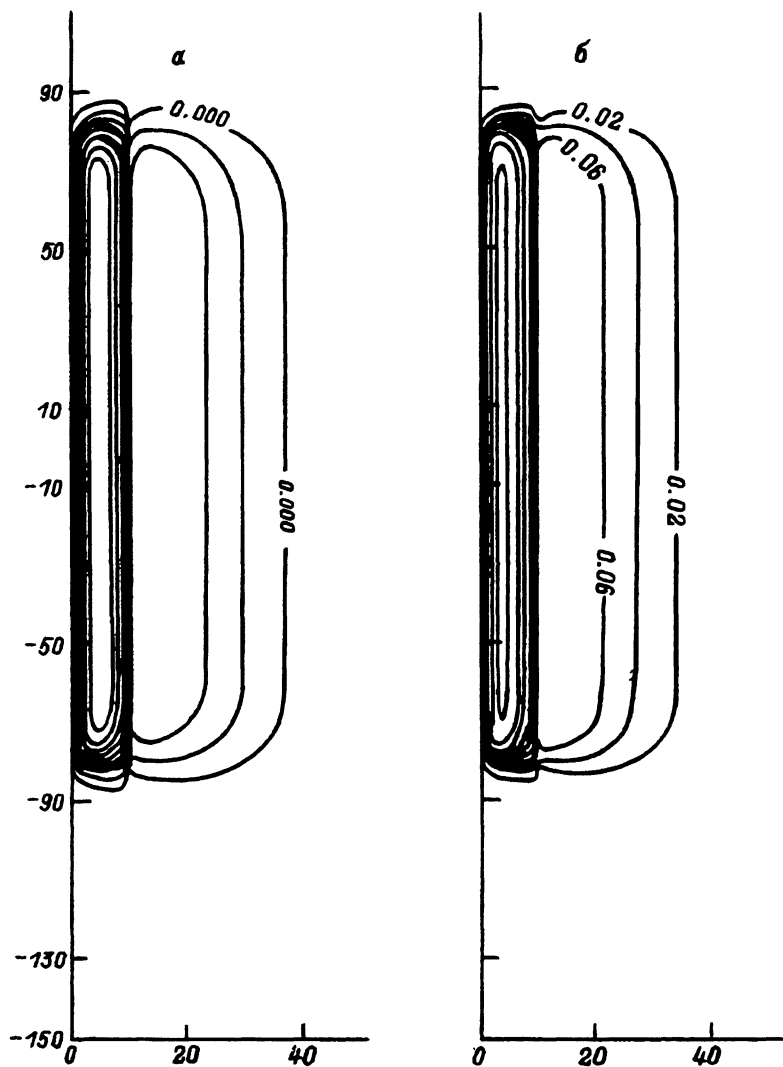


Рис. 2. Изолинии двумерного распределения (в отн. ед.) остановившихся ионов примеси (а) и энергии, выделенной в ядерных столкновениях при имплантации  $\text{Sb}^+$  с энергией 50 кэВ под углом  $90^\circ$  в мишень Ta/Si (слой Ta 10 нм) (б). Расстояние между метками 5 нм.

На рис. 3 и 4 приведены двумерные распределения ионов мышьяка и выделенной в ядерную подсистему энергии, соответствующие имплантации  $\text{As}^+$  с энергией 60 кэВ под углом  $45^\circ$  в кремний через окно шириной 100 нм со слоем тантала толщиной 10 нм и без него. В этих условиях имплантации в слое тантала остановилось 36% внедренных ионов и выделилось 44% от всей энергии. При этом в силу выбранной геометрии эксперимента в обоих случаях (со слоем тантала и без него) под правым краем маски оказалось большее количество примеси (10 и 20% соответственно), чем под левым краем (0.3 и 1%). Следует отметить

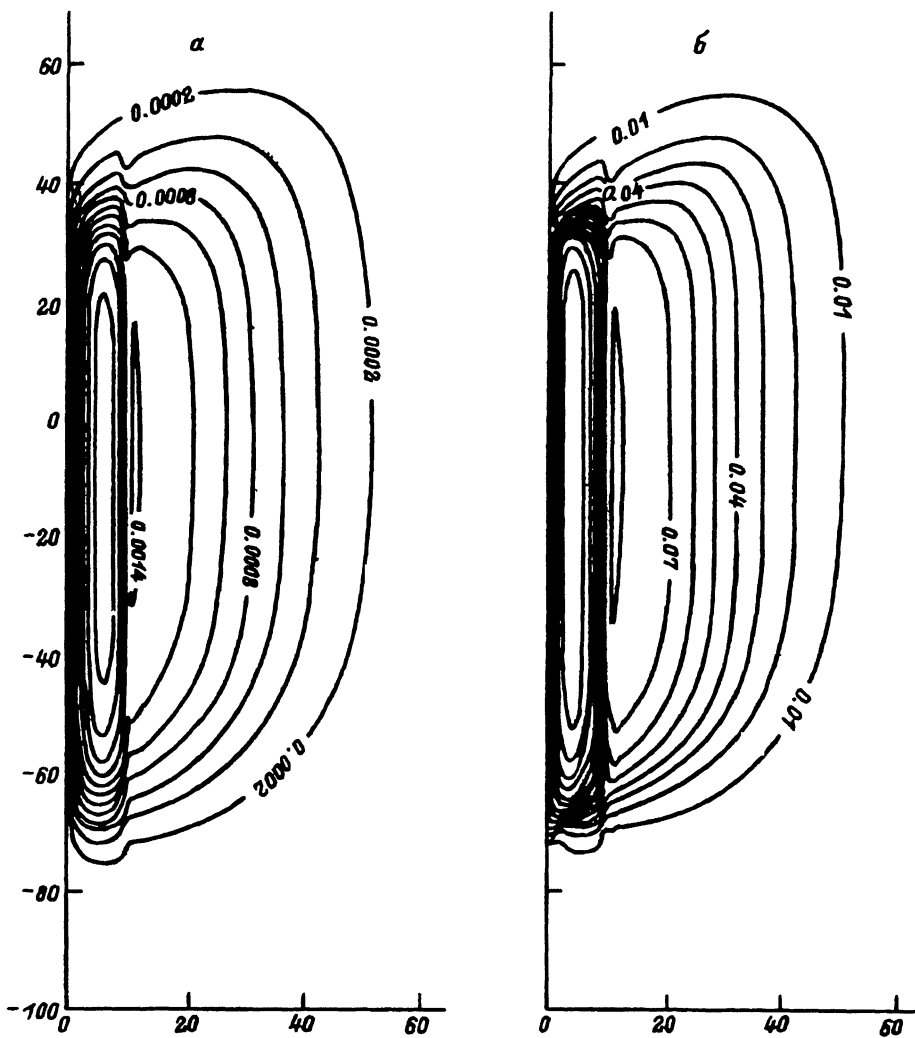


Рис. 3. Двумерные распределения остановившихся ионов примеси (а), энергии, выделенной при ядерных взаимодействиях внедренными ионами  $As^+$  с энергией 60 кэВ под углом  $45^\circ$  в мишень Ta/Si (слой Ta 10 нм) (б). Расстояние между метками 5 нм.

важный факт, заключающийся в том, что при наличии маскирующего покрытия распределение внедренной в кремний примеси оказывается значительно более резким как по глубине, так и в поперечном направлении. Это свидетельствует о возможности создания резких мелких  $p-n$ -переходов при формировании рабочих структур СВИС и УБИС (сверхбольшая и ультрабольшая интегральные схемы). Кроме того, существенная часть упруго выделенной энергии депонируется в слое таптата, что приводит к значительному уменьшению числа дефектов, создаваемых в слое кремния. Следует отметить также то, что при имплантации наклонными пучками возможно возникновение дефектов разного типа под разными краями маски в силу различного количества

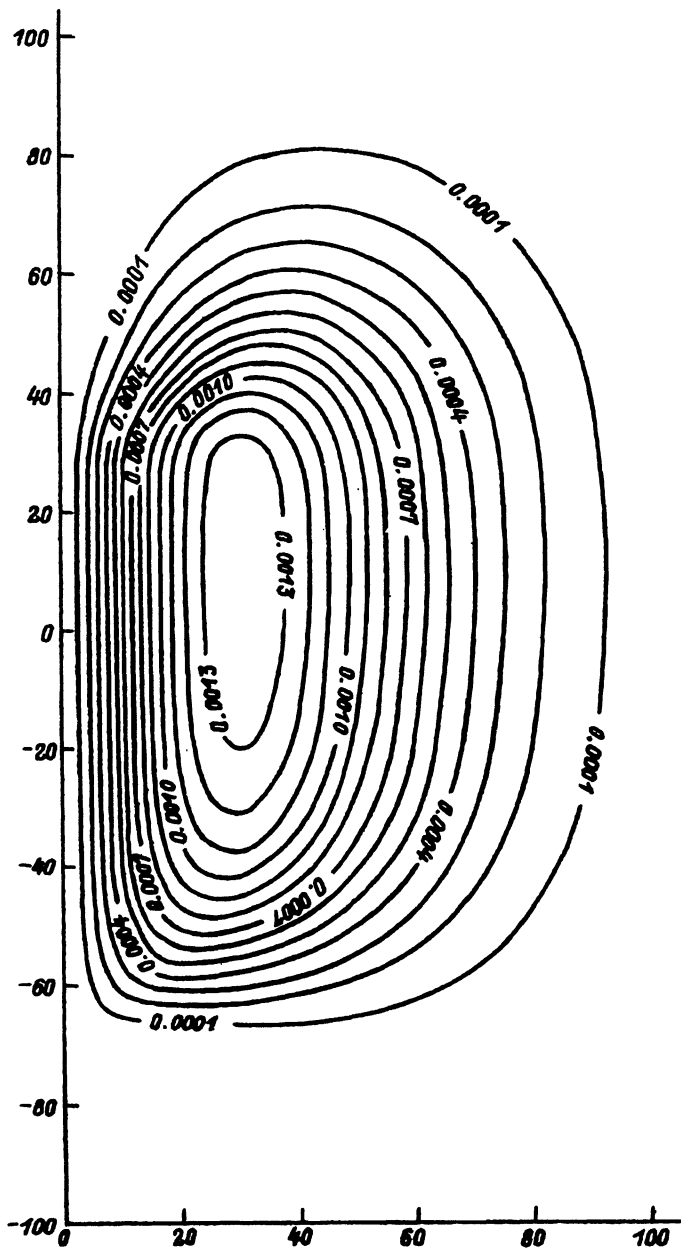


Рис. 4. Двумерное распределение остановившихся ионов примеси при имплантации  $As^+$  с энергией 60кэВ под углом  $45^\circ$  в кремний. Расстояние между метками 5нм.

энергии, выделенной в этих областях на смещение атомов из узлов решетки.

Таким образом, разработанная математическая модель и метод численного решения транспортного уравнения позволяют за разум-

ное время моделировать операцию ионного легирования в слоистую мишень при формировании мелкозалегающих  $p-n$ -переходов, выбрать оптимальные толщины верхнего слоя и энергии ионов. Кроме того, методом компьютерного эксперимента удастся обнаружить ряд интересных физических эффектов, связанных с пространственной топологией легированного слоя, а также спрогнозировать процессы дефектообразования и отжига дефектов структуры при постимплантационных термообработках. Предложенный подход эффективен в проектировании как биполярных, так и интегральных схем металл-окисел-полупроводник.

#### Список литературы

- [1] Furukawa S., Matsumura H., Ishiwara H. // Jap. J. Appl. Phys. 1972. Vol. 23. P. 134.
  - [2] Буренков А.Ф., Курганов А.Г., Конопляник Г.Г. // Поверхность. 1989. № 8. С. 52.
  - [3] Каргашин А.Е., Садовников А.Д. // Радиоэлектроника. 1990. № 3. С. 51.
  - [4] Barthel A., Lorenz J., Ryssel H. // Nucl. Instr. and Meth. 1989. Vol. b37/38. P. 312.
  - [5] Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark J. The Stopping and Range of Ions in Solids. New York: Pergamon, 1985.
  - [6] Giles M.D. // IEEE Transactions on Computer-Aided Design. 1988. Vol. CAD-5. P. 679.
  - [7] Takeda T., Yoshi A. // IEEE Electron Device Lett. 1983. Vol. EDL-4. P. 430.
  - [8] Комаров Ф.Ф., Корзюк А.В., Мозолевский И.Е., Розач В.П. // Микроэлектроника. 1992. Т. 21. С. 60-66.
-