

УДК 539.2

ФИЗИКА

В. М. ГУСЕВ, Н. П. БУШАРОВ, К. Д. ДЕМАКОВ, Ю. Г. КОЗЛОВ

**ВЛИЯНИЕ КАНАЛИРОВАНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНЫХ АТОМОВ БОРА И ФОСФОРА,
ВНЕДРЕННЫХ В МОНОКРИСТАЛЛЫ КРЕМНИЯ**

(Представлено академиком Л. А. Арцимовичем 3 VIII 1970)

В настоящее время большое внимание уделяется изучению внедрения в кремний ионов основных легирующих примесей бора и фосфора как при беспорядочном облучении кристаллов, так и при бомбардировке по некоторым избранным направлениям, в частности по направлениям низкоиндексных кристаллографических осей $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$, $\langle 100 \rangle$ (¹⁻⁵).

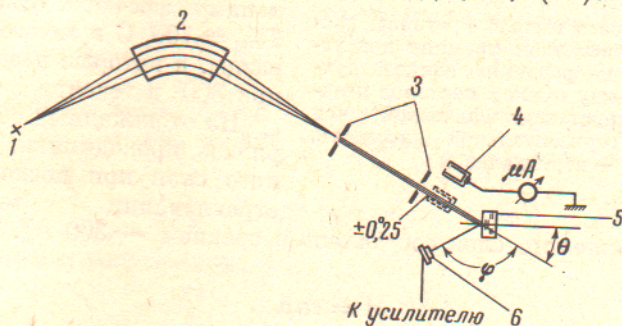


Рис. 1. Схема опыта по ориентированному облучению монокристаллов. 1 — источник ионов, 2 — анализатор, 3 — коллиматор, 4 — фарадеева ловушка, 5 — кристалл (крепится на гониометре), 6 — детектор

В данной работе приводятся результаты исследования распределений концентрации электрически активных атомов-акцепторов и доноров электрическим методом (путем измерения проводимости инверсионного слоя при последовательном тонком стравливании образца) в монокристаллах кремния после облучения их ионами бора с энергией 100 кэВ и фосфора с энергией 150 кэВ по направлению $\langle 100 \rangle$ и под углом $\sim 7^\circ$ к этому направлению.

1. Ориентация кристаллов и их бомбардировка ионами бора и фосфора осуществлялись в одной и той же установке ИЛУ-2 (°) (рис. 1). Ионный пучок после прохождения магнитного анализатора и коллимирующей системы имеет расходимость $\sim 0,25^\circ$.

Монокристаллы кремния с удельным сопротивлением 7,5 ом·см, вырезанные по плоскости (110), крепятся на гониометре, который позволяет поворачивать их относительно двух осей, перпендикулярных друг другу и направлению $\langle 110 \rangle$. Кристаллы *n*-типа проводимости облучались двухзарядными ионами бора с энергией 100 кэВ, образцы дырочной проводимости — трехзарядными ионами фосфора с энергией 150 кэВ. Доза облучения варьировалась в пределах от $3 \cdot 10^{14}$ до $1,2 \cdot 10^{15}$ ион·см⁻².

Для ориентации кристаллов использовался эффект рассеяния протонов под большим углом. Протоны, выходящие из кристалла под углом

$\varphi = 120^\circ$ к направлению ионного пучка, регистрировались полупроводниковым детектором. Эта методика была описана в 1965 году (7), и с тех пор широко применяется для ориентации монокристаллов. В наших опытах энергия протонов составляла всего 50 кэв, тем не менее, как это видно из рис. 2, угловая зависимость выхода протонов имеет четко выраженный минимум. В данном случае минимум наблюдается при вращении

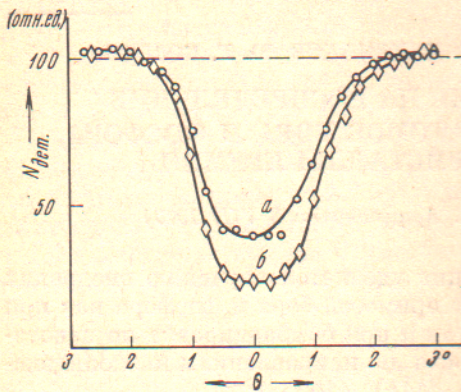


Рис. 2. Зависимость выхода протонов, рассеянных монокристаллом кремния под углом $\varphi \sim 120^\circ$ к направлению ионного пучка от угла θ между пучком протонов и направлением кристаллографической оси $\langle 110 \rangle$; *a* — φ — горизонтальной плоскости, *b* — φ — вертикальной

кристалла как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. Точность ориентации кристаллов была не хуже 1° . Согласно теории Линдхарда (8), критический угол каналирования для ионов бора с энергией 100 кэв и фосфора с энергией 150 кэв примерно один и тот же и равен $\sim 2,6^\circ$.

После облучения образцы отжигались для устранения радиационных дефектов и повышения концентрации электрически активных атомов в ионно-внедренных слоях. Кристаллы, облученные ионами фосфора, отжигались при $T_{отж} = 700^\circ \text{C}$ в течение 30 мин., образцы, в которые вводился бор, — при 800° в течение 1 час.

На отожженных образцах измерялась проводимость σ инверсионного слоя при последующем тонком

сравнении монокристалла (толщина удаляемого слоя составляла в среднем $\sim 300 \text{ \AA}$). Затем по соотношению

$$\sigma = en\mu \quad (1)$$

(μ — подвижность носителей, e — заряд электрона) рассчитывалось распределение концентрации носителей n по глубине легированного слоя.

Ранее было показано, что при условиях облучения и термообработки кристаллов, которые были в данных опытах, происходит практически полный отжиг радиационных дефектов и концентрационная зависимость подвижности в ионно-внедренных слоях является такой же, как и в объемно-легированном кремнии (9, 10). Поэтому при расчете по формуле (1) использовалось обычное соотношение между концентрацией и подвижностью (11).

2. На рис. 3 показаны профили концентрации ионизованных атомов фосфора, полученные при ориентированном облучении монокристаллов (б, в) и облучении под углом 7° к $\langle 110 \rangle$ (а). Следует отметить, что распределение фосфора в кремнии при различных условиях облучения и ориентации кристаллов достаточно хорошо исследовано Дирнли методом радиоактивных изотопов (4). Мы, ставя опыты на фосфоре, стремились, главным образом, проконтролировать свою методику и аппаратуру, а также выяснить, какое влияние на распределение оказывает отжиг образцов после облучения.

Распределение (кривая б), полученное при ориентированном облучении, имеет два достаточно четко выраженных максимума. Ближний к поверхности соответствует неканализованной компоненте пучка, дальний — ионам, попавшим в каналы. Промежуточная часть кривой обусловлена деканализованными частицами. Глубина залегания первого максимума ($\sim 2150 \text{ \AA}$) несколько превышает значение, рассчитанное в соответствии с теорией Линдхарда, Шарфа и Шютта (ЛШШ) $\sim 1900 \text{ \AA}$ (12).

Величина максимального пробега каналированных ионов R_{\max}° (в данном случае $R_{\max}^{\circ} = R_{0,001}$) составляет 1,48 μ . Воспользовавшись измеренным Эйзенем (¹³) значением электронной тормозной способности $S_e'(E_0^*)$

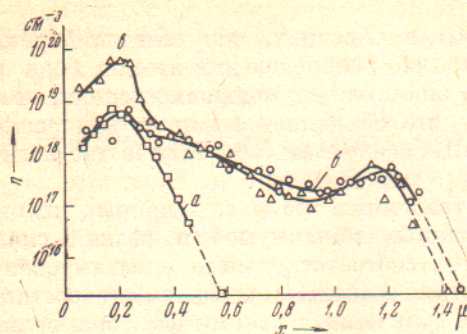


Рис. 3

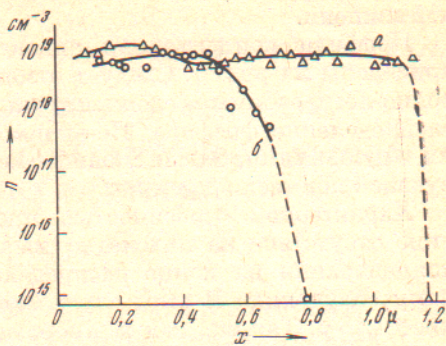


Рис. 4

Рис. 3. Распределения концентрации доноров по глубине ионно-внедренного слоя в монокристаллах кремния; дозы облучения (ион·см⁻²): а — 3·10¹⁴, б — 3·10¹⁴, в — 1,2·10¹⁵; T_{отж} = 700°; t_{отж} = 30 мин.

Рис. 4. Распределение концентрации акцепторов по глубине ионно-внедренного слоя в монокристаллах кремния, облученных ионами бора с энергией 100 кэв. а — облучение по направлению <110>, доза 8·10¹⁴ ион·см⁻²; б — облучение под углом 7° к <110>, доза 1,2·10¹⁵ ион·см⁻², T_{отж} = 800°, t_{отж} = 1 час

для ионов фосфора, движущихся в кремнии в канале <110> с начальной скоростью 1,5·10⁸ см/сек, можно рассчитать R_{\max}° для нашего случая. Согласно (¹⁴)

$$R_{\max}^* = \frac{2}{K^*} (E_0)^{1/2}, \quad (2)$$

где E_0 — начальная энергия иона, а

$$K^* = NS_e'(E_0^*)/(E_0^*)^{1/2}, \quad (3)$$

$N = 5 \cdot 10^{22}$ см⁻³ — число атомов в единице объема кристалла кремния.

$$S_e'(E_0^*) = 5,38 \cdot 10^{-14} \text{ эв} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{ат}^{-1} \text{ при } E_0^* = 370 \text{ кэв.}$$

В результате вычислений получаем, что при энергии ионов фосфора $E_0 = 150$ кэв, $R_{\max}^* = 1,72 \mu$, т. е. экспериментальное значение R_{\max}° примерно на 15% меньше расчетного.

Таблица 1

Представляет интерес сопоставить полученное нами значение максимального пробега с данными других авторов (см. табл. 1).

Видно, что и в тех случаях, когда проводился отжиг образцов, величина R_{\max}° не превышает значения R_{\max}^* рассчитанного по данным работы (¹³).

Представленное на рис. 3 распределение доноров в образце, облученном под углом 7° к направлению <110>, имеет максимум, положение которого достаточно хорошо соответствует теории ЛШШ для аморфного кремния и простирающийся в глубь кристалла хвост, который, по-видимому, обусловлен проникновением ионов по ближайшим каналам.

На рис. 3 видно, как трансформируется профиль распределения для «ориентированного» облучения при увеличении дозы ионов фосфора в 4 раза (кривая в). Часть распределения, обусловленная каналированными ионами, практически не изменяется, но высота ближнего к поверхности

E, кэв	T _{отж} , °C	R _{max} ^o , μ	R _{max} [*] , μ	Источник
150	700	1,48	1,72	Наши опыты (¹) (¹⁵)
110	Без отжига	1,35	1,48	
80	650	1,25	1,25	

сти максимума увеличивается в несколько раз. Такой эффект, вероятно, связан с аморфизацией поверхностного слоя кристалла при дозах ионов фосфора, превышающих $3 \cdot 10^{14}$ ион/см². В аморфном слое пучок ионов разориентируется, и движение частиц происходит так же, как и в аморфной мишени.

Профили концентрации акцепторов в образцах, облученных бором, приведены на рис. 4. Следует отметить, что распределение атомов бора в ионно-легированных слоях изучено в значительно меньшей степени, чем распределение фосфора. По-видимому, это объясняется как методическими трудностями, так и специфическим поведением бора в качестве легирующей примеси в кремнии.

Характерной особенностью представленных на рис. 4 кривых является отсутствие на них четко выраженных максимумов и резкий спад концентрации на конце распределения, соответствующего ориентированному облучению. В этом случае величина максимального пробега составляет 1,18 м. Так же, как и в образцах, облученных ионами фосфора, величина R_{\max}^0 несколько меньше полуэмпирического значения $R_{\max}^* = 1,26$ м, рассчитанного по данным (13).

Наши экспериментальные данные (резкая внутренняя граница распределения, $R_{\max}^0 < R_{\max}^*$) согласуются с результатами опытов Рута и Эйзена (2), из которых следует, что после отжига при 600° распределение внедренного в кремний бора определяется не диффузией, а динамическим процессом рассеяния каналированных ионов.

Дэвис, исследовавший внедрение ионов бора с энергией 0,1—2,0 Мэв в монокристаллы кремния при беспорядочном облучении, также отмечает, что увеличение температуры отжига образцов от 650 до 850° не оказывало существенного влияния на распределение вбитых атомов (5).

Слабое изменение концентрации между первым максимумом и внутренней границей распределения для ориентированного облучения на рис. 4 свидетельствует об интенсивном процессе деканализации ионов бора при их движении от поверхности в глубь кристалла. Причины размытого характера максимумов и очень плавного спада концентрации к поверхности не вполне ясны. К сожалению, методика, примененная в работах (2, 4, 5), не позволила определить ход кривой распределения акцепторов на участке от его внутренней границы до поверхности кристалла. Дэвис (5) отмечает, однако, что распределение атомов бора далеко не симметрично и что спад концентрации к поверхности значительно более плавный, чем этого следовало ожидать.

Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова
Академии наук СССР
Москва

Поступило
20 VII 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ G. Dearnaley, Proc. Roy. Soc. A, 311, 21 (1969). ² R. Ruth, F. H. Eisen, Proc. Conf. on Application of Ion Beams to Semiconductor Technology, Grenoble, 1967, p. 539. ³ J. F. Gibbons, A. H. El-Hoshy et al., Appl. Phys. Lett., 8, 46 (1966). ⁴ W. J. Kleinfelder, W. S. Johnson, J. F. Gibbons, Canad. J. Phys., 46, 597 (1968). ⁵ D. E. Davies, Solid State Electronics, 13, 229 (1970). ⁶ В. М. Гусев, Н. П. Бушаров и др., Приборы и техн. эксл., № 4, 19 (1969). ⁷ E. Bøgh, E. Ugerhøg, Nuclear Instr. and Meth., 38, 216 (1965). ⁸ J. Lindhard, Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk., 34, 2 (1965). ⁹ В. М. Гусев, Ю. Г. Козлов, Тез. XIV Всесоюз. конфер. по эмиссионной электронике, Ташкент, 1970, стр. 89. ¹⁰ V. M. Gusev, M. I. Guseva et al., Colloque International sur l'Action des Rayonnements sur Les Composants a Semiconductors, 1967, p. A17. ¹¹ J. C. Irvin, The Bell System Techn. J., 41, 387 (1962). ¹² J. Lindhard, M. Scharff, H. Schiott, Mat. Fys. Medd. Dan. vid. selsk., 33, 1 (1963). ¹³ F. H. Eisen, Canad. J. Phys., 46, 561 (1968). ¹⁴ J. F. Gibbons, Proc. of the IEEE, 56, 295 (1968). ¹⁵ G. Dearnaley, Reports on Progress in Physics, 32, 405 (1969).