

ТРУДЫ
VII Международной конференции
по атомным столкновениям
в твердых телах

МОСКВА, 19—23 СЕНТЯБРЯ 1977 ГОДА

Том 2

РАДИАЦИОННОЕ ПОВРЕЖДЕНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВНЕДРЕННОЙ ПРИМЕСИ В АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ ФОСФОРА

И. М. Белин, Ф. Ф. Комаров, Н. С. Тишлык

СССР. Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем, Белорусский государственный университет, г. Минск

Г. Гетц, Г. Ширмер

ГДР. Университет им. Ф. Шиллера, г. Йена

Продолжительное время изучается дефектообразование в сложных полупроводниках типа $A^{III}B^{V}$ при имплантации в них ионов [1, 2]. Наряду с исследованиями электрофизических [2], оптических [3, 4], структурных (методами электронной микроскопии и электронографии [2]) свойств, имеются данные об образовании нарушений при имплантации ряда ионов (Zn, O, Sb, Xe) в кристаллы GaAs, GaP и др., полученные методом обратного рассеяния ускоренных легких ионов [5].

Однако практически отсутствуют сведения об образовании дефектов в сложных полупроводниках при внедрении ионов фосфора и алюминия. Поэтому представляются интересными исследования радиационных нарушений в арсениде галлия, имплантированном ионами фосфора.

В настоящей работе представлены основные результаты исследований образования дефектов в имплантированном ионами P^+ арсениде галлия в зависимости от интегрального потока и энергии ионов, температуры и ориентации кристаллов в процессе имплантации. Изучено также влияние названных параметров на распределение внедренного фосфора.

Механически, а затем химически полированные кристаллы GaAs, вырезанные с ориентацией (111), облучались ионами P^+ с энергией 30 и 60 кэВ и интегральными потоками от $3 \cdot 10^{15}$ до $7 \cdot 10^{17}$ ион/см². Внедрение проводилось в кристаллы, находящиеся при комнатной температуре или подогреваемые до 300, 350, 400, 450°С. Ток ионов в большинстве опытов составлял 10—15, а в отдельных опытах 30—40 мкА/см². Для выяснения влияния ориентации на распределение дефектов и внедряемых ионов выполнялись опыты с кристаллами, разориентированными по отношению к лучу на угол не менее 15°.

Имплантированные кристаллы исследовались методом обратного рассеяния (ОР) с помощью ускоренных до $E=1,4$ МэВ ионов гелия. Обратно рассеянные на угол 160° ионы He^+ регистрировались поверхностно-барьерным детектором с энергетическим разрешением $\Delta E=15$ кэВ. Снимались (111) — осевые и «случайные» (для неориентированной мишени) спектры. При переходе к шкале глубин использовались значения потерь энергии ионов He^+ в неориентированных кристаллах GaAs из [6].

На рис. 1, а, б, представлены спектры ОР от кристаллов GaAs, имплантированных ионами P^+ с $E=60$ кэВ и интегральными потоками: при $T_{\text{ион}}$ $2 \cdot 10^{15}$; $3,2 \cdot 10^{16}$ и $8 \cdot 10^{16}$ ион/см², при $T=300^\circ\text{C}$ $3 \cdot 10^{16}$; $1,5 \cdot 10^{17}$ и $3,9 \cdot 10^{17}$ ион/см².

Анализируя характер изменения осевых и случайных спектров на рис. 1 а отметим, что выход осевых спектров имплантированных при $T_{\text{ион}}$ достигает выхода случайных спектров на глубине 500—600 Å. Размеры полностью разупорядоченного

слоя равны 150—200 и 250—300 Å, для доз $3 \cdot 10^{15}$ и $3,2 \cdot 10^{16}$ ион/см², соответственно. При этом приповерхностный слой толщиной 500—600 Å остается сильно нарушенным, но не полностью разупорядоченным, в чем проявляется специфика данного материала, его способность к самозалечиванию путем диффузии и стока дефектов на поверхность. И только при дозе $8 \cdot 10^{16}$ ион/см² выход осевого спектра совпадает с выходом случайного от поверхности до максимума дефектного пика, что, возможно, происходит из-за больших, чем при дозах $3 \cdot 10^{15}$ и $3,2 \cdot 10^{16}$ ион/см², изменений в составе матрицы вблизи поверхности.

С ростом дозы ионов происходит расширение пика дефектов в сторону большей глубины (до 1800—2000 Å) и появляются глубинные «хвосты» (до 4700 Å).

Однако превышение глубины залегания пика дефектов и особенно хвостов по сравнению с теоретической оценкой Кумахова и др. [7]. ($R_p=587$ Å) характерно для всех доз ионов, внедренных в GaAs при комнатной температуре. Такое различие в глубине залегания пика дефектов может быть объяснено ускоренной диффузией их в глубь кристалла в процессе имплантации. Аргументом в пользу данного предположения может служить, с одной стороны, наблюдаемый сдвиг профиля дефектов в сторону больших глубин и появление глубинных хвостов дефектов на спектрах ОР при увеличении интегральных потоков внедряемых ионов, а с другой стороны — увеличение глубины расположения максимума дефектов с ростом температуры имплантации (рис. 1, б, кривая 2), так как повышение температуры при облучении эффективно стимулирует диффузионные процессы.

Полагая, что величина площади под пиком нарушений на спектрах ОР (S_d) может служить показателем степени поврежденности кристалла, выполнен ее расчет, результаты которого приведены в таблице. В ней же представлены значения χ_{min} — отношение величины выхода в области за пиком нарушений к величине выхода неориентированного кристалла для спектров, показанных на рис. 1.

Таблица

Значения S_d и χ_{min} для различных доз и температур имплантации

Параметр	Температура имплантации					
	$T_{\text{ион}}$			300°С		
$\Phi, \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$	0,3	3,2	8	3	15	39
S_d	4,88	5,98	5,96	2,77	3,6	5,04
χ_{min}	0,4	0,43	0,51	0,42	0,43	0,51

Из выполненных расчетов (таблица) следует, что содержание дефектов в имплантированных кристаллах изменяется незначительно при увеличении дозы более, чем на порядок, т. е. при интегральных потоках $1-8 \cdot 10^{16}$ ион/см² достигается насыщение дефектами поврежденного слоя в случае имплантации при комнатной температуре.

Изменение χ_{min} с дозой отличается от изменения S_d . По-видимому, причина в том, что χ_{min} является характеристикой не только числа рассеивающих центров (этот параметр отражается достаточно полно площадью под пиком дефектов), но представляется характеристикой состояния границы между матрицей и имплантированным слоем. Это состояние при внедрении примесей, способных вступать в химические соединения, может отличаться по мере изменения количества внедренной примеси в том смысле, что в полностью разупорядоченном приповерхностном слое при образовании новой фазы могут происходить неравноценные искажения в области границы из-за различных количеств новой фазы при внедрении различных интегральных потоков ионов. Предлагаемое объяснение применимо, на наш взгляд, для понимания экспериментальных результатов, когда S_d перестает изменяться с дозой, а χ_{min} продолжает расти. Важным представляется анализ изменения состава матрицы в приповерхностных слоях, частично эти изменения обсуждены в [8].

Повышение температуры имплантации при внедрении ионов P^+ в GaAs приводит к значительным изменениям в спектрах ОР по сравнению с имплантацией при комнатных температурах.

Для иллюстрации представлены дозовая зависимость дефектообразования при внедрении P^+ в GaAs, подогреваемый до 300°С (рис. 1б), и температурная зависимость на рис. 2. Из приведенных спектров следует, что величина выхода на осевых спектрах не достигает значений выхода случайных спектров даже для самых больших доз, т. е. аморфизации GaAs при внедрении в него P^+ при $T \geq 300^\circ\text{C}$ до значений доз $\sim 7 \cdot 10^{17}$ ион/см² не происходит.

Изменение S_d с дозой (таблица) свидетельствует о монотонном возрастании содержания дефектов с ростом дозы. Вместе с тем изменение значений χ_{min} и величина этого параметра практически совпадают с рассмотренным выше случаем внедрения при комнатной температуре. Совпадение следует, конечно, считать случайным, но оно свидетельствует о том, что для достижения уровня поврежденности, характерного для комнатных температур, при имплантации в подогреваемую мишень необходимы в 5—10 раз большие дозы ионов.

Рассматривая глубинное распределение дефектов, следует остановиться на следующем. Глубина залегания основного максимума дефектов на осевых спектрах составляет $\sim 2000 \text{ \AA}$, что в ~ 4 раза больше глубины залегания максимумов пиков дефектов, получаемых при комнатной температуре легирования. Другое существенное отличие от облучения при $T_{\text{ком}}$ заключается в том, что с увеличением дозы происходит рост числа нарушений не только за счет повышения их концентрации, но и в результате расширения дефектного пика, однако не в области больших глубин, а к поверхности (кривые 4, 6, 8 на рис. 1, б).

При этом с ростом дозы, так же, как при $T_{\text{ком}}$, на спектрах ОР образуются хвосты дефектов, глубина распространения которых оценивается уже в $\sim 4500-5000 \text{ \AA}$.

Температурная зависимость дефектообразования представлена на рис. 2. При внедрении в GaAs ионов P^+ с $E=30 \text{ кэВ}$, так же, как для $E=60 \text{ кэВ}$, толщина поврежденного слоя ($300-400 \text{ \AA}$ при $T_{\text{ком}}$) превышает теоретически оцениваемую ($R_p \approx 250 \text{ \AA}$ [7]). Имплантация при повышенных температурах (300, 350, 400°С) приводит к тому, что максимум дефектного пика смещается на глубину $1200-1300 \text{ \AA}$. Одновременно значительно уменьшается выход ОР ионов в области пика дефектов. Так, $\chi_{\text{max}}=0,77; 0,42; 0,33$ при температурах 300, 350 и 400°С соответственно, S_d в расчете на единицу дозы при повышении температуры уменьшается и при $T=400^\circ\text{C}$ составляет 0,6 от S_d , полученной при комнатной температуре легирования. Уменьшение поврежденности с ростом температуры легирования происходит в основном за счет отжига приповерхностных дефектов. Кристаллы GaAs, имплантированные ионами P^+ , при повышенных температурах характеризуются достаточно совершенной структурой поверхности, что подтверждено электронографически.

Вместе с тем, изменение χ_{min} при варьировании температуры мишени во время имплантации имеет более сложный характер, чем поврежденность в приповерхностных слоях, что связывается нами, как уже отмечалось выше, с ростом бомбардирующих ионов, так как при отличающихся температурах возможно протекание нескольких трудно разделимых процессов (разрушение матрицы, синтез тройного соединения, диффузия фосфора в глубь кристалла), каждый из которых дает вклад в увеличение выхода на спектрах ОР.

В распределении внедренного фосфора, которое получено при анализе приподнятий на случайных спектрах (на всех рисунках) в области до 160 канала, наблюдается многопиковый характер, рис. 3.

При комнатных температурах внедрения фосфор распределен до глубин 0,3 и 0,5 мкм при энергиях ионов 30 и 60 кэВ (кривые 1 и 2, рис. 3). При повышении температуры пространственное распределение имплантированного фосфора еще более усложнено. В некоторых опытах можно разделить пики от фосфора, находящегося на глубине $\sim 1 \text{ мкм}$. Причем для него характерно слоистое распределение с достаточно высокой концентрацией в слоях.

Для иллюстрации зависимости образования и распределения по глубине дефектов и внедренных ионов от направления внедрения на рис. 4 показаны спектры ОР от обычных кристаллов и от кристаллов, которые при имплантации специально разориентировались на 15° . При этом выполнялось ступенчатое легирование. На первой стадии в кристаллы GaAs внедрялись ионы P^+ с $E=60 \text{ кэВ}$, на второй — с $E=30 \text{ кэВ}$. Опыты выполнялись для двух температур подложек: комнатной и 450°С.

В сравнительном эксперименте при $T_{\text{ком}}$ (рис. 4, а) выяснилось: расположение максимумов пиков дефектов и их ширина на осевых спектрах совпадают. Уровень дефектности в разориентированном кристалле несколько ниже, чем в обычном.

хотя нарушения в составе матрицы значительнее. На том и другом спектре ярко выражены глубинные хвосты дефектов и глубина залегания в обычном кристалле меньшая, чем в разориентированном. В распределении фосфора отмечаются лишь незначительные отклонения в деталях.

При температуре мишени 450°C разориентирование дало следующие результаты (рис. 4 б): так же, как и при комнатной температуре, только более заметно, уменьшилось содержание дефектов, особенно в приповерхностной области. В отличие от внедрения при $T_{\text{комн}}$ уменьшилось также нарушение матрицы в приповерхностной области. Уменьшилось и содержание фосфора в основном пике, хотя добавился пик фосфора на самой поверхности.

В заключение мы выражаем благодарность М. А. Кумахову, Х. Треффу, Г. Грюске за полезное обсуждение результатов и помощь в выполнении эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sunsburi J. D., Gibbons J. F. — «Rad. Eff.», 1970, v. 6, p. 269.
2. Зелевинский В. М., Качурин Г. А., Смирнов Л. С. — «Микроэлектроника», 1973, т. 2, с. 252.
3. Harris J. S., Elsen F. H. — «Rad. Eff.», 1971, v. 7, p. 123.
4. Aoki K., K. Gama et al. — «Jap. J. Appl. Phys.», 1976, v. 15, p. 405.
5. Picraux S. T. — «Rad. Eff.», 1973, v. 17, p. 261.
6. Gartner K., Hehl K. — Wiss. Ztsch. Friedrich Schiller Univ., Jena. Mat-Nat. R. 22. Jg. 1973, N1/2, p. 257.
7. Кумахов М. А. и др. — Деп. ВИНТИ, 1976, № 700—75.
8. Комаров Ф. Ф., Ташлыков И. С. — «Доклады АН БССР», 1977, № 10.

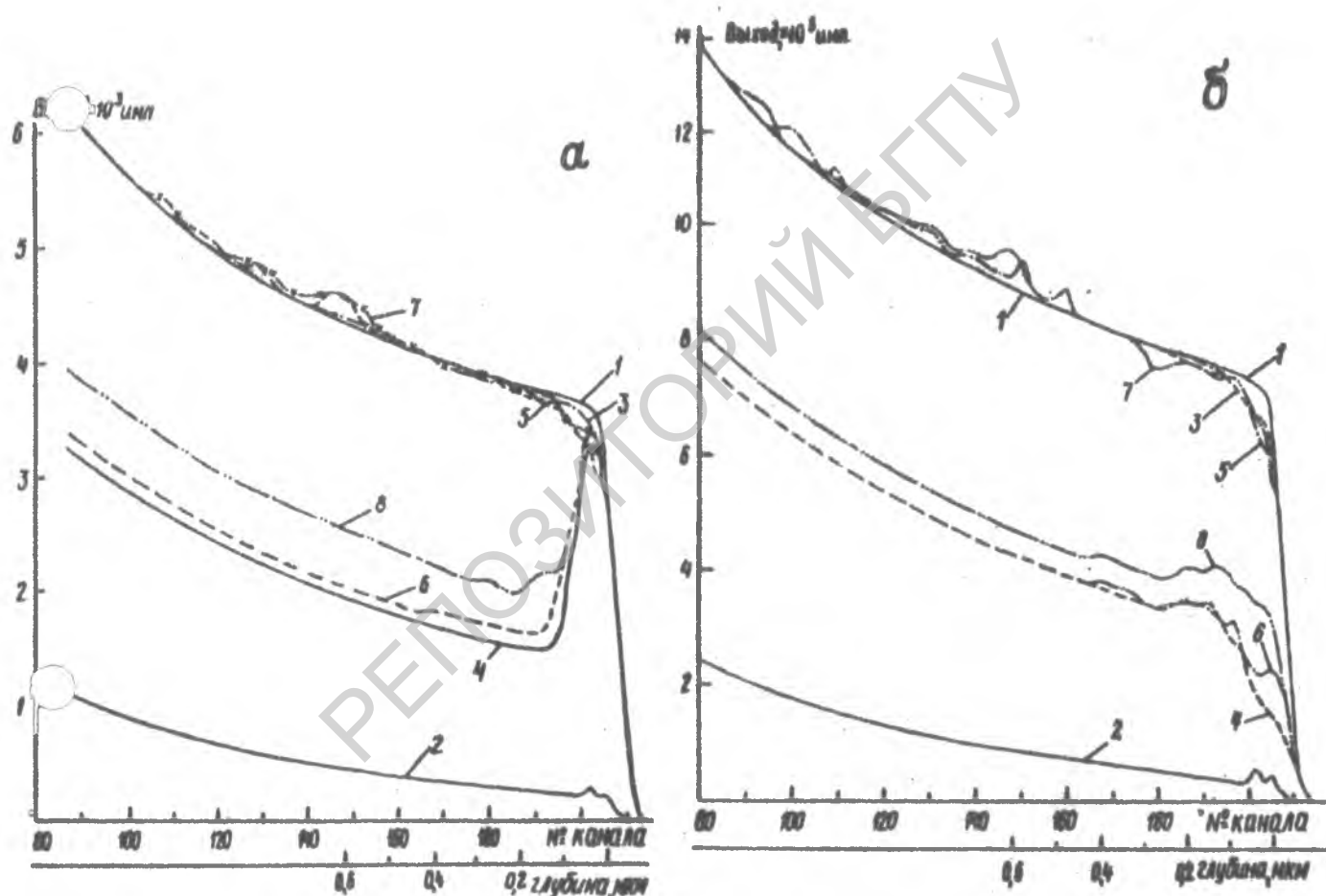


Рис. 1. Спектры обратного рассеяния ионов He^+ с энергией $E_{\text{He}^+} = 1.4 \text{ МэВ}$ на кристаллах GaAs, имплантированных ионами фосфора с энергией 60 кэВ

а — случайные и осевые спектры, полученные на кристаллах, имплантируемых при нормальной температуре: 1, 2 — до имплантации; 3, 4 — с дозой имплантации $3 \cdot 10^{16} \text{ ион/см}^2$; 5, 6 — с дозой имплантации $3,2 \cdot 10^{16} \text{ ион/см}^2$; 7, 8 — с дозой имплантации $8 \cdot 10^{16} \text{ ион/см}^2$; б — случайные и осевые спектры, полученные на кристаллах, имплантированных при $T = 300^\circ\text{C}$ с интегральной дозой: 3, 4 — $3 \cdot 10^{16} \text{ ион/см}^2$; 5, 6 — $1,5 \cdot 10^{17} \text{ ион/см}^2$; 7, 8 — $3,9 \cdot 10^{17} \text{ ион/см}^2$

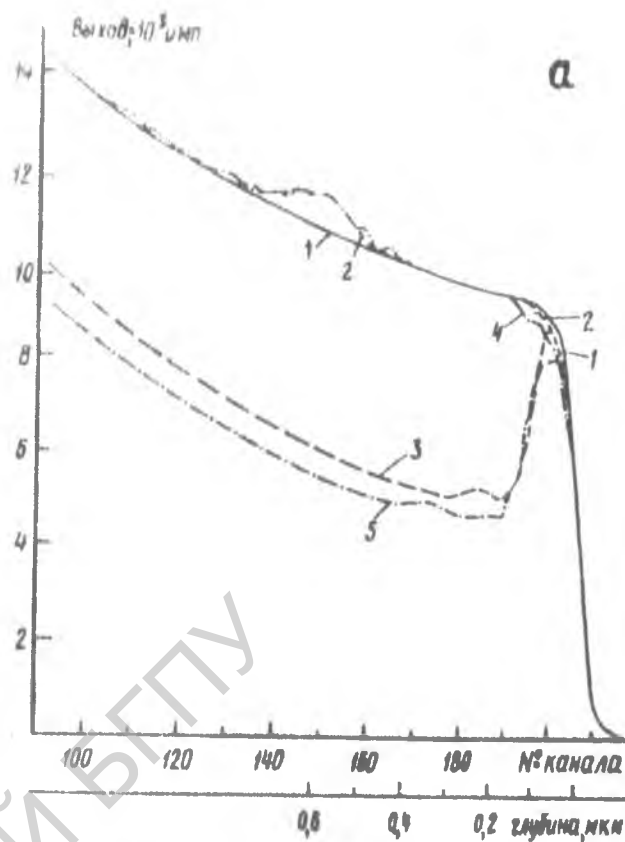
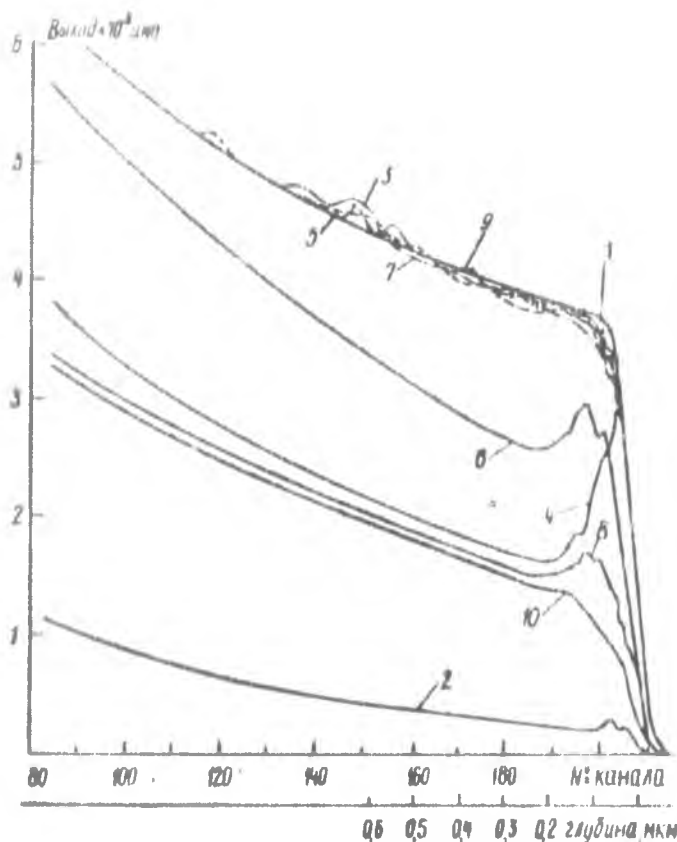


Рис. 2 Случайные и осевые спектры обратного рассеяния ионов He^+ с энергией 1,4 МэВ на кристаллах GaAs имплантированных ионами фосфора с энергией 30 кэВ

1, 2 — до имплантации; имплантируемых дозами 3, 4 — $7 \cdot 10^{16}$ ион/см² при нормальной температуре, 5, 6 — $8,2 \cdot 10^{16}$ ион/см² при $T=300^\circ\text{C}$; 7, 8 — $3,3 \cdot 10^{16}$ ион/см² при $T=350^\circ\text{C}$; 9, 10 — $2 \cdot 10^{16}$ ион/см² при $T=400^\circ\text{C}$.

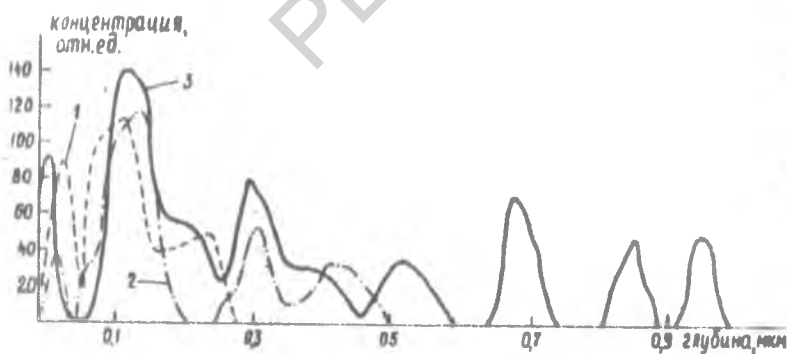


Рис. 3. Пространственное распределение фосфора, имплантированного при различных энергиях и дозах в кристалл GaAs

1 — при энергии 30 кэВ, дозе $7 \cdot 10^{16}$ ион/см² и нормальной температуре; 2 — при энергии 60 кэВ, дозе $3,2 \cdot 10^{16}$ ион/см² и нормальной температуре; 3 — при дозе $3,9 \cdot 10^{17}$ ион/см² и $T=300^\circ\text{C}$

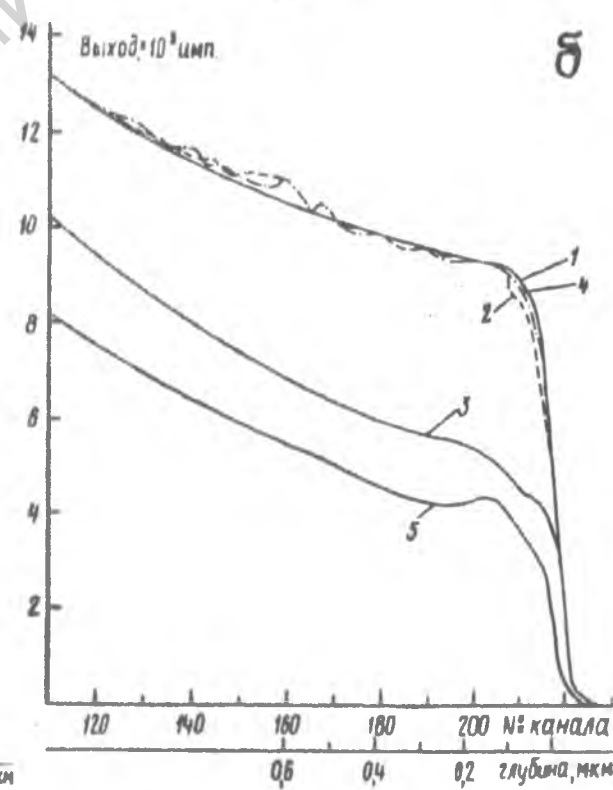


Рис. 4. Случайные и осевые спектры обратного рассеяния ионов He^+ с энергией 1,4 МэВ на кристаллах GaAs имплантированных методом ступенчатого легирования

а — при нормальной температуре: 1 — до имплантации, 2, 3 — при имплантации вдоль оси $\langle 111 \rangle$ последовательно ионами фосфора с энергией 60 кэВ и дозой $8 \cdot 10^{16}$ ион/см² и затем с энергией 30 кэВ и дозой $3 \cdot 10^{16}$ ион/см², 4, 5 — при имплантации при том же режиме под углом 15° к оси $\langle 111 \rangle$; б — при $T=450^\circ\text{C}$: 1 — до имплантации; 2, 3 — при имплантации вдоль оси $\langle 111 \rangle$ последовательно ионами фосфора с энергией 60 кэВ, дозой $4 \cdot 10^{17}$ ион/см² и затем с энергией 30 кэВ, дозой $2,7 \cdot 10^{17}$ ион/см²; 4, 5 — при имплантации при том же режиме под углом 15° к оси $\langle 111 \rangle$