

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕЛКИХ И ГЛУБОКИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЦЕНТРОВ В ИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ БЕРИЛЛИЕМ СЛОЯХ ФОСФИДА ИНДИЯ

Абрамов А. А., Захарикова Л. П., Микуленок А. В., Стоянова И. Г.

С помощью метода измерений вольт-фарадных характеристик барьера электролит—полупроводник исследовано распределение носителей заряда в ионно-легированных бериллием слоях фосфида индия. Показано, что метод может быть использован для контроля распределения в слое заряженных ловушек, связанных с радиационными дефектами имплантации. Определены условия, при которых метод позволяет корректно определить распределение концентрации свободных носителей заряда, обусловленных активацией примеси Ве. Исследовано поведение Ве при различных условиях постимплантационного обычного и быстрого термических отжигов. Отмечается существенное влияние диффузионных процессов при обычном отжиге на распределение свободных дырок в ионно-легированном слое.

Определение распределения концентрации носителей заряда по глубине в ионно-легированных слоях фосфида индия обычно производится с помощью метода дифференциальных измерений эффекта Холла [<sup>1, 2</sup>], что является сложным и трудоемким процессом. Применение для этих целей метода измерений вольт-фарадных ( $C-V$ ) характеристик барьера металл—полупроводник сталкивается с трудностями формирования качественного барьера Шоттки на InP [<sup>3</sup>]. Проблема получения барьера Шоттки на InP легче решается, если вместо металла используется электролит. Важным продолжением такого подхода является применение электролита в качестве средства контролируемого растворения образца *in situ*, что позволяет производить определение профиля концентрации носителей заряда практически на любую глубину. Тем самым метод  $C-V$ -измерений на барьере электролит—полупроводник свободен от основных недостатков, присущих  $C-V$ -измерениям на барьере металл—полупроводник, среди которых — необходимость специальной обработки поверхности и ограничение глубины измеряемого слоя напряжением электрического пробоя барьера, что является серьезным препятствием при исследовании сильно легированных материалов.

Данный метод нашел широкое применение при измерении профилей концентрации свободных носителей заряда, обусловленных ионизованными мелкими донорными или акцепторными примесями, в совершенных слоях полупроводников, полученных различными методами эпитаксии [<sup>4, 5</sup>]. Для ионно-легированных слоев его применение ограничено [<sup>6, 7</sup>]. Ионная имплантация сопровождается генерацией большого числа радиационных дефектов, часть из которых не устраняется полностью в результате последующего отжига. Этим дефектам могут соответствовать глубокие уровни в запрещенной зоне полупроводника. Глубокие центры в зависимости от их зарядового состояния дают вклад в общий заряд и емкость области пространственного заряда барьера электролит—полупроводник [<sup>8, 9</sup>]. Это, с одной стороны, ограничивает возможности электрхимического  $C-V$ -метода для определения профиля свободных носителей заряда, но с другой — позволяет контролировать распределение заряженных радиационных эффектов в ионно-легированных слоях, что исследовано в работе для слоев InP, имплантированных легкими ионами Ве.

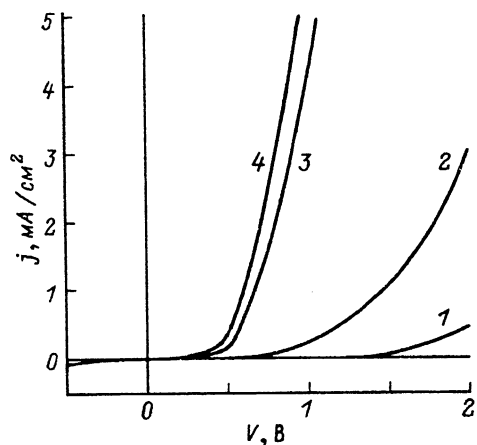


Рис. 1.  $I-V$ -характеристики барьера на частоте  $f = 3.2$  кГц при различных дозах имплантации  $\text{Be}^+$ .

Доза имплантации,  $\text{см}^{-2}$ : 1— $1 \cdot 10^{13}$ , 2— $5 \cdot 10^{13}$ , 3— $2 \cdot 10^{14}$ , 4— $1 \cdot 10^{15}$ .  $T_{\text{отж}} = 850^\circ\text{C}$ ,  $t = 10$  с.

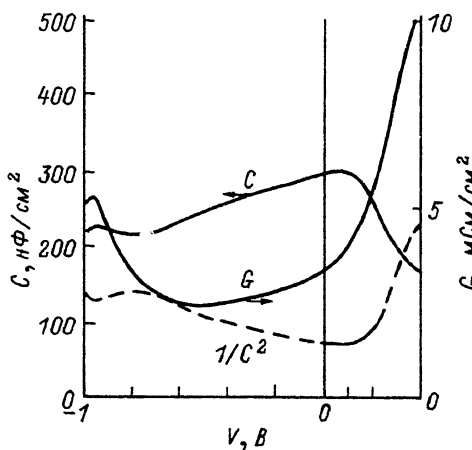


Рис. 2.  $C-V$ ,  $G-V$ - и  $1/C^2-V$ -характеристики барьера на частоте  $f = 3.2$  кГц для  $\text{InP}$ , имплантированного дозой  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ .

$T_{\text{отж}} = 850^\circ\text{C}$ ,  $t = 10$  с.

## Образцы и методика эксперимента

Использовались образцы нелегированного монокристаллического фосфида индия (марка ФИЭ-1а), выращенного по методу Чохральского. Имплантация ионов  $\text{Be}$  осуществлялась при энергии 100 кэВ в диапазоне доз  $1 \cdot 10^{13} \div 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Для устранения радиационных дефектов и активации внедренной примеси использовалось два варианта последующего отжига. В первом случае имплантированные слои отжигались в печи в диапазоне температур  $650 \div 750^\circ\text{C}$  длительностью 15 мин. Во втором варианте образцы подвергались быстрому термическому отжигу (БТО) в интервале температур  $750 \div 850^\circ\text{C}$  длительностью  $2 \div 10$  с.

Для проведения  $C-V$ -измерений на барьере электролит — ионно-легированный слой исследуемый образец приводился в контакт с электролитом при помощи специальной ячейки. Процесс определения профиля концентрации носителей заряда состоял из чередования двух этапов. На первом этапе определялась толщина стравленного слоя полупроводника путем интегрирования тока электрохимического растворения материала в соответствии с законом Фарадея [5]. Затем производилось измерение емкости  $C$  и дифференциальной емкости  $dC/dV$  барьера электролит—полупроводник и по известным формулам [5] рассчитывалась величина концентрации носителей заряда.

В качестве электролита использовался раствор  $0.5 \text{ M HCl}$ . Характеристики барьера измерялись на переменном сигнале амплитудой 0.14 В на частоте диапазона 1—25 кГц. Площадь контакта полупроводника с электролитом составляла  $0.1 \text{ см}^2$ . Разработанная методика позволяла стравливать слои  $\text{InP}$  с минимальным шагом 10 нм. Процессы электрохимического разложения материала и измерений управлялись персональным компьютером.

## Результаты и их обсуждение

С целью оценки качества сформированного барьера электролит—ионно-легированный слой  $\text{InP}$  и определения условий травления образца и измерений  $C$  и  $dC/dV$  предварительно измерялись вольт-амперные ( $I-V$ ), вольт-фарадные ( $C-V$ ) характеристики и характеристика барьера проводимость—напряжение ( $G-V$ ). На рис. 1 представлены  $I-V$ -харак-

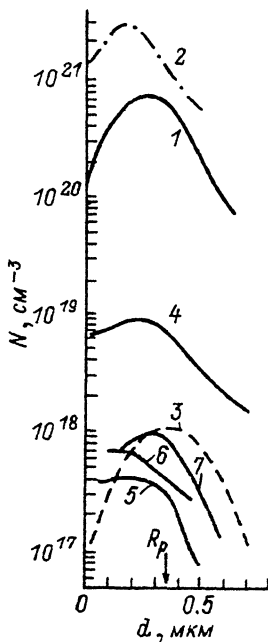


Рис. 3. Распределение концентрации носителей заряда для InP, имплантированного  $\text{Be}^+$  дозой  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  ( $f = 3.2 \text{ кГц}$ ).

1 — без отжига; 2 — расчетное распределение дефектов; 3 — расчетное распределение атомов Be; 4 — отжиг  $750^\circ\text{C}$ , 2 с; 5 — отжиг  $750^\circ\text{C}$ , 10 с; 6 — отжиг  $800^\circ\text{C}$ , 10 с; 7 — отжиг  $800^\circ\text{C}$ , 10 с.

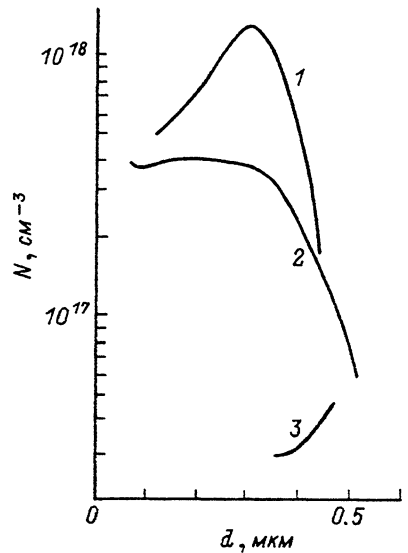


Рис. 4. Распределение концентрации носителей заряда для InP, имплантированного  $\text{Be}^+$  дозой  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  с последующим БТО  $750^\circ\text{C}$ , 10 с, измеренное на различных частотах  $f$  напряжения модуляции.

$f$ , кГц: 1 — 1.0, 2 — 3.2, 3 — 25.

теристики на частоте  $f = 3.2 \text{ кГц}$  барьера электролит—фосфид индия, который подвергался имплантации  $\text{Be}^+$  в диапазоне доз  $1 \cdot 10^{13} \div 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и БТО при  $T = 85^\circ\text{C}$  в течение 10 с. Видно, что чем больше доза имплантированного  $\text{Be}^+$ , тем выше величина анодного тока, генерируемого при приложении прямого смещения к барьеру. Увеличение тока, видимо, связано с неотожженными радиационными дефектами. С применением растровой электронной микроскопии нами установлено, что плотность анодного тока  $j = 3 \div 4 \text{ мА/см}^2$  является оптимальной для бездефектного травления материала при всех использованных дозах  $\text{Be}^+$  (неселективность травления, отсутствие пленки анодного окисла, приемлемая скорость травления). В соответствии с этим величина постоянного смещающего напряжения, необходимого для электрохимического разложения InP, выбиралась в диапазоне  $0.6 \div 3\text{В}$  в зависимости от дозы имплантации  $\text{Be}^+$ .

Величина напряжения смещения барьера, при которой измерялись емкость и дифференциальная емкость, выбиралась с учетом двух требований: проводимость барьера  $G$  должна быть минимальной и зависимость  $1/C^2$  от напряжения должна иметь линейный участок. В качестве примера на рис. 2 приведены зависимости  $C$ ,  $G$  и  $1/C^2$  ( $f = 3.2 \text{ кГц}$ ) от напряжения смещения для InP, имплантированного дозой  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  с последующим БТО при  $850^\circ\text{C}$  в течение 10 с. Величина напряжения смещения, удовлетворяющая указанным выше требованиям, находится в диапазоне  $-(0.2 \div 0.7) \text{В}$ .

На рис. 3 (кривая 1) представлен измеренный профиль концентрации носителей заряда для InP, имплантированного дозой  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  без последующего отжига. Видно, что измеренный профиль качественно согласуется с теоретическим профилем концентрации радиационных дефектов, образующихся в результате ядерных столкновений (кривая 2), а не с га-

уссовым профилем концентрации внедренной примеси Ве [10] с максимумом распределения при  $R_p = 0.38$  мкм (кривая 3). Распределение дефектов рассчитывалось на основе данных работы [11].

О том, что измеренный профиль представляет собой распределение связанных носителей заряда на ловушках, обусловленных радиационными дефектами, свидетельствуют данные по измерению профилей при различных частотах модулирующего напряжения на барьере (рис. 4). Из-за больших времен перезарядки ловушек их вклад в емкость барьера оказывается существенным при низких частотах модулирующего напряжения и с увеличением частоты модуляции  $f$  уменьшается. Из рис. 4 видно, что ионно-легированный слой имеет довольно высокую концентрацию заряженных ловушек  $(0.5 \div 1) \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, которые регистрируются при низких частотах модуляции (кривая 1 —  $f = 1$  кГц, кривая 2 —  $f = 3.2$  кГц). Повышение частоты до  $f = 25$  кГц приводит к тому, что практически не удастся измерить профиль в пределах имплантированного слоя, что свидетельствует, с одной стороны, о резком уменьшении вклада связанных носителей заряда в измеряемую емкость барьера, а с другой — об отсутствии свободных носителей заряда в ионно-легированном слое, обусловленных активацией Ве при выбранных режимах имплантации и отжига.

Концентрация глубоких ловушек оказывается очень чувствительной к режимам БТО. БТО при 750 °С в течение всего лишь 2 с приводит к снижению концентрации дефектов на ~2 порядка (рис. 3, кривая 4), а увеличение времени отжига до 10 с дает снижение концентрации дефектов еще в ~20 раз (кривая 5).

Увеличение температуры при БТО до 800 и 850 °С вызывает увеличение концентрации носителей заряда в измеренных профилях до уровня  $\sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup> (рис. 3, кривые 6, 7). Измеренный профиль для  $T_{отж} = 850$  °С и  $t = 10$  с в основном представляет собой профиль концентрации свободных дырок, появляющихся в результате активации Ве. О незначительном вкладе радиационных дефектов в измеренный профиль (кривая 7) свидетельствуют, во-первых, независимость его формы от частоты модулирующего напряжения на барьере, во-вторых, предварительные данные, полученные нами по низкотемпературной фотолюминесценции, которые подтверждают эффективный отжиг дефектов и активацию примеси бериллия. Профиль распределения свободных носителей заряда коррелирует с теоретическим распределением внедренного бериллия (кривые 7 и 3). Максимум концентрации распределения дырок  $\sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup> приблизительно совпадает с максимумом распределения бериллия, что свидетельствует о достаточно эффективной активации Ве при использованных режимах БТО. Профиль свободных дырок (активированных атомов Ве) смещен к поверхности по отношению к профилю распределения примеси. Это свидетельствует о геттерирующем влиянии радиационных дефектов имплантации на перераспределение Ве при БТО и о незначительной диффузии в объем кристалла.

Диффузия примеси Ве в объем кристалла незначительна при использованных режимах БТО вплоть до самых высоких ( $1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>) доз имплантации (рис. 5). Напротив, при обычном отжиге в течение 15 мин происходит заметное диффузионное размытие профиля свободных носителей заряда (форма профиля не зависит от частоты модуляции для  $T_{отж} > 700$  °С) к поверхности и в объем кристалла (рис. 6), причем наиболее сильно бериллий диффундирует при дозах более  $\sim 1 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>. Это говорит о том, что диффузия Ве в InP является концентрационно зависимой, т. е. коэффициент диффузии зависит от концентрации примеси Ве в слое, концентрации радиационных дефектов (зависит от  $T_{отж}$ ), отклонения от стехиометрии и т. п. В результате при высокой дозе имплантации Ве можно получить слой  $p$ -типа проводимости глубиной до 1.5 мкм (рис. 6, кривая 4).

Важно отметить, что ни при обычном отжиге, ни при БТО не удастся получить концентрацию свободных дырок в ионно-легированном слое выше

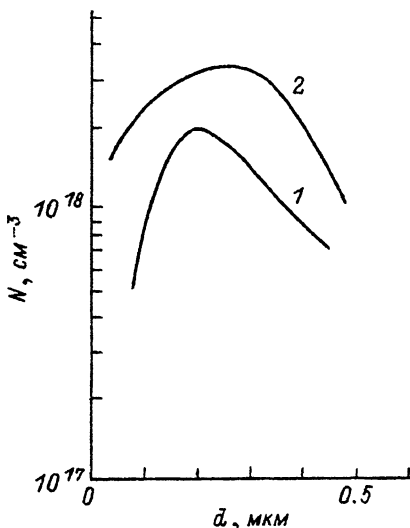


Рис. 5. Профили концентрации носителей заряда ( $f=3.2$  кГц) для InP, имплантированного  $\text{Ve}^+$  дозой  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  с последующим ВТО.  
1 —  $800^\circ\text{C}$ , 10 с; 2 —  $850^\circ\text{C}$ , 10 с.

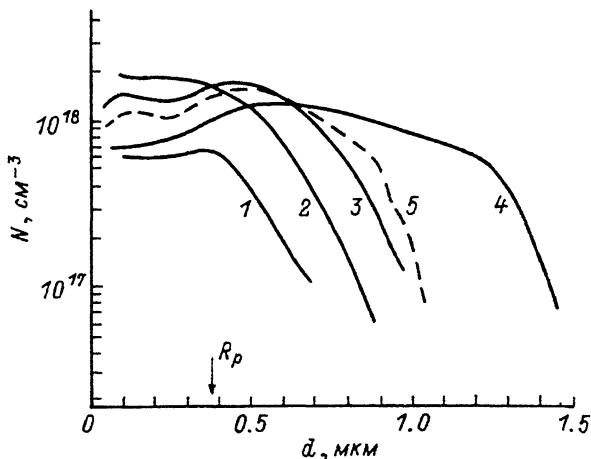


Рис. 6. Профили концентрации носителей заряда ( $f=3.2$  кГц) для InP, имплантированного  $\text{Ve}^+$  с последующим отжигом  $750^\circ\text{C}$  (1—4) и  $700^\circ\text{C}$  (5), 15 мин. Доза имплантации,  $\text{см}^{-2}$ : 1 —  $1 \cdot 10^{13}$ ; 2 —  $1 \cdot 10^{14}$ ; 3 —  $5 \cdot 10^{14}$ ; 4, 5 —  $1 \cdot 10^{15}$ .

$\sim 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  при всех использованных дозах. Величина  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  определяется, по-видимому, диффузионным перераспределением акцепторных центров  $\text{Ve}$  (при обычном отжиге) и их частичной компенсацией остаточными радиационными дефектами или связыванием с ними в комплексы (главным образом при ВТО). Следует отметить, что проблема получения концентрации свободных дырок выше  $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$  в ионно-легированных слоях InP существует для всех акцепторов II группы Периодической таблицы [1, 2].

Таким образом, показано, что, с одной стороны, методика  $C-V$ -измерений на барьере электролит—полупроводник может быть весьма полезной для определения распределения заряженных радиационных дефектов имплантации и их поведения в результате термообработки, особенно в диапазоне концентраций  $10^{18} \div 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , в котором находится предел чувствительности таких распространенных методов, как резерфордовское обратное рассеяние и просвечивающая электронная микроскопия. С другой стороны, именно факт регистрации электрически активных дефектов затрудняет интерпретацию измеряемых профилей. Поэтому, для того чтобы однозначно установить, определяется измеренный профиль распределением свободных носителей заряда или электрически активных ловушек, необходимо проводить  $C-V$ -измерения на различных частотах модулирующего напряжения, а также дополнительно применять другие методики, чувствительные к дефектному составу кристалла, например фотолюминесценцию.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Inada T., Taka S., Yamamoto Y. // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. N 7. P. 4863—4865.
- [2] Inada T., Taka S., Yamamoto Y. // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. N 11. P. 6623—6629.
- [3] Pande K. P., Nair V. K. R. // J. Appl. Phys. 1984. V. 55. N 7. P. 3109—3113.
- [4] Lile D. L., Collins D. A. // Electron. Lett. 1978. V. 14. N 9. P. 457—458.
- [5] Ambridge T., Stevenson J. L., Redstall R. M. // J. Electrochem. Soc. 1980. V. 127. N 1. P. 222—228.
- [6] Kräutle H. // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. N 9. P. 4418—4421.
- [7] Bahir G., Merz J. L., Abelson J. R., Sigmon T. W. // J. Appl. Phys. 1989. V. 65. N 3. P. 1009—1017.

- [8] Tell B., Brown-Goebeler K. F. // J. Appl. Phys. 1987. V. 62. N 3. P. 813—818.
- [9] Bahir G., Merz J. L., Abelson J. R., Sigmon T. W. // J. Electrochem. Soc. 1987. V. 134. N 9. P. 2187—2193.
- [10] Gibbons J. F., Johnson W. S., Mylroie S. W. Projected Range Statistics. Stroudsburg, 1975.
- [11] Артамонов В. В., Черняев А. В. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. 1987. № 5. С. 81—89.

Научно-производственное объединение «Орион»  
Москва

Получена 16.08.1991  
Принята к печати 22.10.1991

