

УДК 621.315.592

## Совместная имплантация кремния и фосфора в нелегированную и легированную индием подложки GaAs

© Н.Н. Дымова<sup>2</sup>, А.Е. Куницын<sup>1</sup>, А.В. Марков<sup>3</sup>, В.В. Чалдышев<sup>1</sup><sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 117924 Москва, Россия<sup>3</sup>Государственный институт редкометаллической промышленности, 109017 Москва, Россия

(Получена 24 июня 1997 г. Принята к печати 14 июля 1997 г.)

Исследованы электрические свойства и низкотемпературная (4.2 К) фотолюминесценция сильнолегированных слоев *n*-типа проводимости, полученных имплантацией ионов кремния и кремния совместно с фосфором в нелегированные и легированные индием полуизолирующие подложки GaAs, выращенные методом Чохральского. Показано, что совместная имплантация Si + P приводит к подавлению глубоких уровней в анионной подрешетке, увеличивает степень активации доноров и позволяет получить более резкий профиль распределения внедренной примеси в подложках обоих типов. Использование подложек GaAs, легированных изовалентной примесью In, не сказывается на степени активации доноров, но способствует отжигу радиационных дефектов.

### 1. Введение

В настоящее время метод ионной имплантации широко применяется в производстве полупроводниковых приборов. В частности, с его помощью создаются слои с повышенной концентрацией носителей зарядов обоих типов, необходимые при изготовлении полевых транзисторов и интегральных микросхем различного применения. Проблема получения слоев с максимально возможной концентрацией электронов не может быть решена простым увеличением дозы имплантируемой примеси по ряду причин. Повышение дозы имплантации сопровождается увеличением количества вводимых радиационных дефектов, для отжига которых требуется более жесткая термообработка, нежелательная, в частности, из-за ухудшения профиля распределения легирующей примеси и усложняющая технологию качественного изготовления слоев. В случае приборов, создаваемых на подложках арсенида галлия, следует также учитывать возможность вхождения имплантированных атомов в подрешетки обоих типов. Эта проблема тем более актуальна, что наиболее распространенной примесью, применяющейся для формирования слоев *n*-типа проводимости в GaAs методом ионной имплантации, является кремний, имеющий низкий коэффициент диффузии в арсениде галлия и сравнительно малый атомный вес. При повышенных дозах имплантации этот элемент IV группы встраивается не только в подрешетку галлия (донор Si<sub>Ga</sub>), но и в подрешетку мышьяка (акцептор Si<sub>As</sub>), тем самым снижая степень активации доноров за счет самокомпенсации. Кроме того, большие дозы кремния приводят к формированию глубоких уровней в анионной подрешетке, в которых Si связан с собственными дефектами решетки.

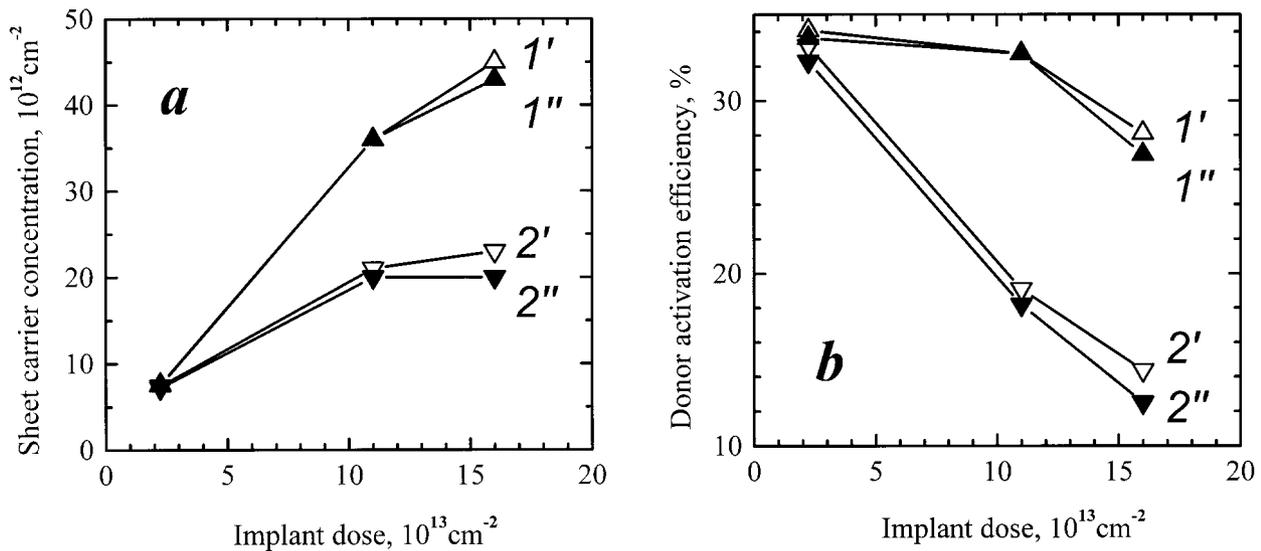
Ранее [1,2] было показано, что совместная имплантация изовалентной примеси P и электрически активной примеси Si в GaAs приводит к увеличению степени активации доноров. Известно также, что введение небольшого количества изовалентной примеси In позволяет получать монокристаллы GaAs с низкой плотностью дислокаций методом Чохральского [3], а при выращивании эпитаксиальных слоев приводит к уменьшению концентрации глубоких уровней [4,5].

В данной работе анализируются результаты совместного использования двух изовалентных примесей для получения сильнолегированных слоев *n*-типа проводимости за счет двойной имплантации Si + P в легированные индием подложки полуизолирующего арсенида галлия, выращенные методом Чохральского. Проведено сравнение экспериментальных данных по имплантации Si и Si + P в подложки GaAs (In) и подложки нелегированного GaAs.

### 2. Эксперимент

Нелегированные и легированные индием полуизолирующие подложки GaAs с ориентацией (100), толщиной 300 мкм и диаметром 40 мм были вырезаны из монокристаллов, выращенных методом Чохральского с жидкостной геметизацией. Удельное сопротивление подложек составляло  $4.5 \cdot 10^8$  и  $2.4 \cdot 10^7$  Ом · см соответственно.

Процесс ионной имплантации проводился при комнатной температуре с использованием ионов  $^{30}\text{Si}^+$  и  $^{31}\text{P}^+$  с энергиями 20, 50 и 125 кэВ таким образом, чтобы получить однородно легированный слой толщиной 0.1 мкм. Концентрация примесей варьировалась от  $2.2 \cdot 10^{13}$  до  $1.6 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> для кремния и от  $1.1 \cdot 10^{14}$  до  $1.6 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> для фосфора. Последующий отжиг слоев проводился при температуре 850 °С в течение 15 мин. в атмосфере



**Рис. 1.** Зависимость слоевой концентрации электронов (а) и степени активации доноров (б) от дозы имплантированного кремния. 1', 1'' — образцы, имплантированные Si + P; 2', 2'' — образцы, имплантированные только Si. Тип подложки: 1', 2' — нелегированная; 1'', 2'' — легированная индием.

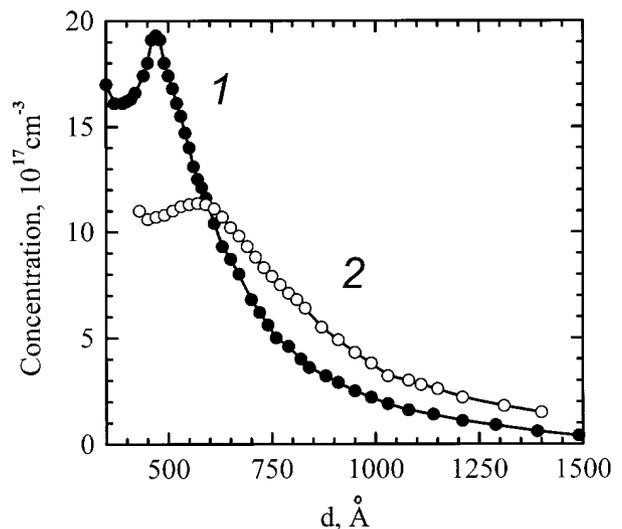
водорода под защитой слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 0.12 мкм, нанесенного на пластины GaAs пиролитическим способом при температуре  $700^\circ\text{C}$ .

Для исследования полученных слоев использовались низкотемпературная фотолюминесценция (ФЛ) и электрические измерения. Измерения подвижности и концентрации носителей заряда проводились методом Ван-дер-По при температурах 77–300 К. Профили распределения носителей заряда были получены путем измерения вольт-фарадных характеристик с применением послойного травления образцов. Исследования ФЛ проводились при температуре 4.2 К в спектральном диапазоне 800–1200 нм. Возбуждение производилось  $\text{Ar}^+$ -лазером (длина волны 514.5 нм), для регистрации сигнала использовался охлаждаемый фотоэлектронный умножитель ФЭУ-62.

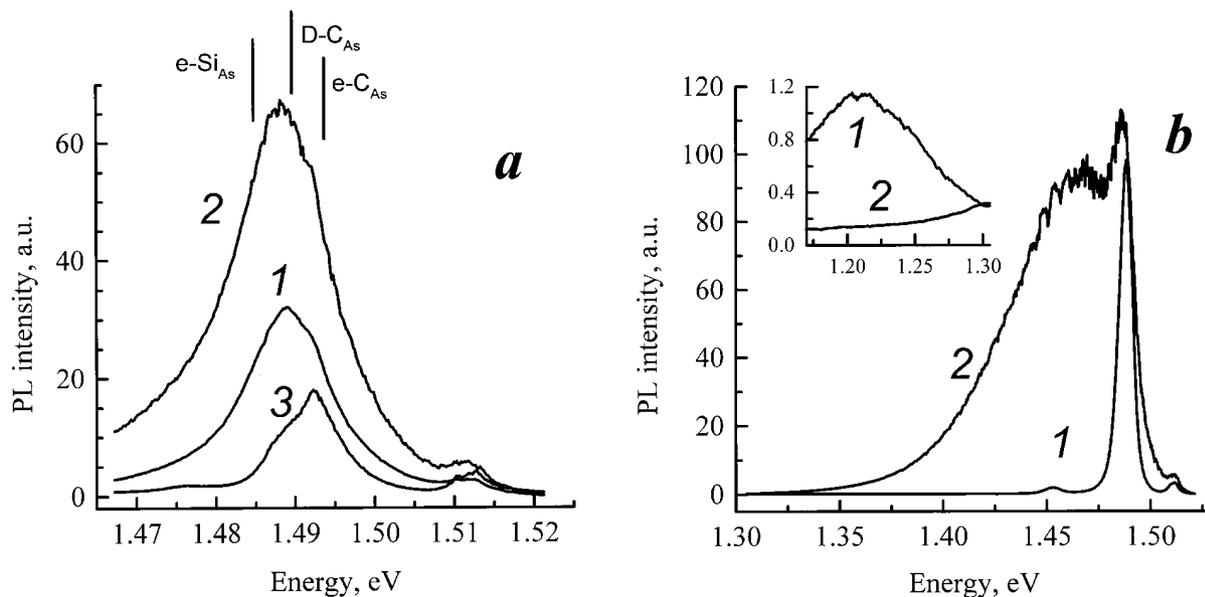
### 3. Результаты

На рис. 1 показаны слоевая концентрация носителей заряда (а) и коэффициент активации доноров (б) для всех образцов в зависимости от дозы имплантированного кремния. Видно, что во всех случаях увеличение дозы электрически активной примеси приводит к уменьшению степени активации доноров. Однако, при больших дозах совместная имплантация кремния и фосфора ведет к увеличению коэффициента активации доноров (а, следовательно, и слоевой концентрации электронов) в 1.5–2 раза по сравнению с введением только Si. Видно также, что использование различных типов подложки (нелегированной и легированной индием) практически не оказывает влияния на эти параметры.

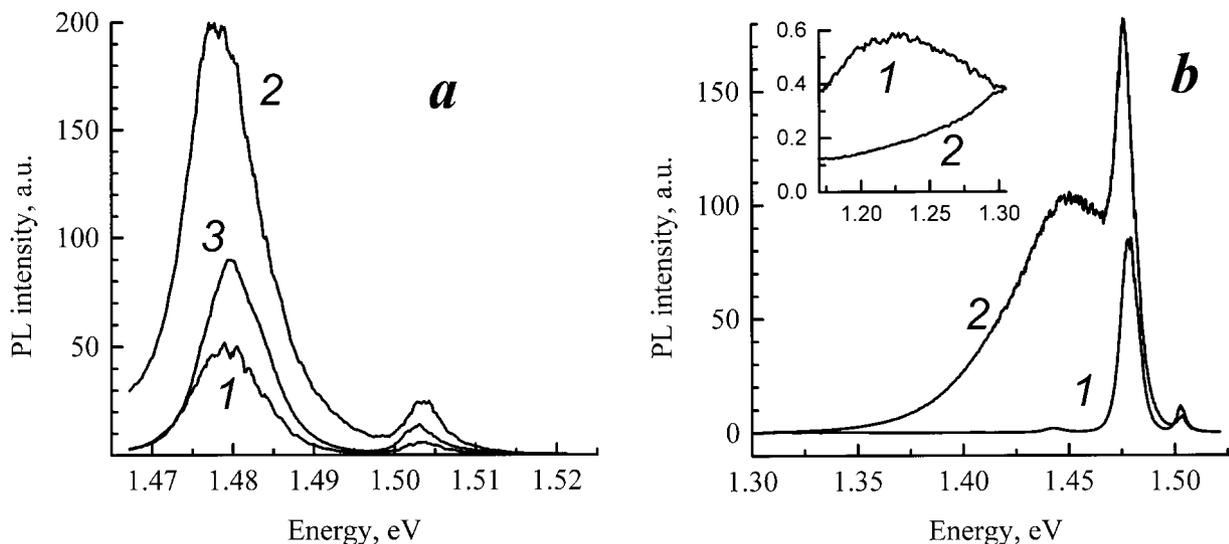
Измерения подвижности электронов показали, что при переходе от малых доз имплантации к большим подвижность уменьшается от  $3100$  до  $1800 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  в образцах, выращенных на нелегированных подложках, и от  $3250$  до  $2100 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  на подложках, легированных индием. При любых дозах внедренных ионов совместная имплантация кремния и фосфора не ухудшала значения подвижности носителей заряда по сравнению с имплантацией только ионов кремния, а в некоторых случаях превышала ее на 30%, т.е. несмотря на большее количество создающихся радиационных дефектов двойная имплантация электрически активной примеси Si и изовалентной примеси P не приводит к ухудшению кристаллического со-



**Рис. 2.** Типичные профили концентрации электронов в GaAs:Si + P (1) и GaAs:Si (2).



**Рис. 3.** Спектры низкотемпературной (4.2 К) фотолюминесценции слоев GaAs, полученных имплантацией малых (*a*) и больших (*b*) доз Si и Si + P в нелегированную подложку. 1 — двойная имплантация, 2 — имплантация одного кремния, 3 — спектр подложки.



**Рис. 4.** Спектры низкотемпературной (4.2 К) фотолюминесценции слоев GaAs, полученных имплантацией малых (*a*) и больших (*b*) доз Si и Si + P в подложку, легированную индием. 1 — двойная имплантация, 2 — имплантация одного кремния, 3 — спектр подложки.

вершенства слоя. Следует отметить, что неравномерное распределение индия по монокристаллу GaAs(In) не позволило провести количественный анализ полученных данных по подвижности носителей заряда в зависимости от дозы имплантированной примеси. Однако, сравнение данных для слоев GaAs:Si и GaAs:Si + P с одинаковыми дозами кремния приводит к качественно одинаковым результатам.

На рис. 2 показан типичный профиль распределения концентрации носителей заряда по глубине слоя, полученный путем измерения вольт-фарадных характеристик.

Видно, что, кроме более резкого профиля концентрации электронов, совместная имплантация кремния и фосфора приводит к повышению максимальной концентрации носителей на 20–50% по сравнению с одиночной имплантацией.

На рис. 3, *a* представлены спектры низкотемпературной ФЛ образцов, имплантированных Si и Si + P в случае малых доз имплантируемых примесей. Для сравнения также показан спектр ФЛ подложки GaAs. В исходном нелегированном GaAs наблюдались линии ФЛ, связанные с межзонными переходами (1.512 эВ), а также ли-

нии, относящиеся к переходам между зоной и мелкими акцепторами С и Ge (1.492 и 1.476 эВ), сопровождающиеся серией фоновых повторений [6]. Как в случае имплантации одного кремния, так и при совместной имплантации Si + P интегральная интенсивность фотолюминесценции возрастает, причем это увеличение более заметно в образце с одиночной имплантацией. Интенсивность линий, связанных с мелкими акцепторами, увеличивается в большей степени, чем линий краевого излучения, а максимум акцепторной полосы смещается в сторону больших длин волн. Если в случае двойной имплантации этот сдвиг можно объяснить увеличением вклада донорно-акцепторной рекомбинации с участием фонового акцептора углерода, то при имплантации одного кремния большее смещение акцепторной полосы следует связать с появлением в спектре линий, связанных с Si<sub>Ga</sub> [6]. При увеличении дозы имплантированных ионов (рис. 3, б) в GaAs:Si в спектре появляется чрезвычайно широкая акцепторная полоса с максимумом 1.45–1.47 эВ, интенсивность которой растет при дальнейшем повышении дозы имплантации. Для образцов с двойной имплантацией вместо полосы 1.45–1.47 эВ наблюдается слабая широкая линия в области 1.2 эВ, интенсивность которой также увеличивается с ростом дозы внедряемых ионов.

Спектры ФЛ образцов, полученных на подложках, легированных индием, для малых (а) и больших (б) доз имплантации показаны на рис. 4. Изменения, вызванные как отличиями дозы имплантации, так и набором имплантированных ионов, носят такой же качественный характер, что и в предыдущем случае. Все линии сдвинуты в сторону больших длин волн вследствие уменьшения ширины запрещенной зоны материала за счет присутствия индия. Следует отметить, что полосы излучения 1.45–1.47 эВ [для GaAs(In):Si] или 1.2 эВ [для GaAs(In):Si,P] проявляются при больших дозах имплантации, чем в случае использования нелегированных подложек. Интегральная интенсивность ФЛ образцов, выращенных на легированной индием подложке, при любых дозах имплантации выше по сравнению с образцами, полученными на нелегированной подложке. Кроме того, в случае легирования подложки индием отмечается увеличение вклада донорно-акцепторных переходов по сравнению с материалом, полученным на нелегированной подложке GaAs.

#### 4. Обсуждение результатов

Результаты наших исследований показывают, что влияние двойной имплантации кремния и фосфора проявляется сходным образом для образцов, полученных как на нелегированных подложках, так и на подложках, легированных индием.

Исследования фотолюминесценции показали, что при повышении дозы имплантации ионы кремния формируют в арсениде галлия не только доноры Si<sub>Ga</sub>, но и акцепторы Si<sub>As</sub>, а также образуют комплексы, ответственные за

полосу ФЛ с центром 1.45–1.47 эВ. Обычно эту линию ФЛ связывают с присутствием в анионной подрешетке дефектов Ga<sub>As</sub>, Ga<sub>i</sub>-Si<sub>As</sub> и V<sub>As</sub>-Si<sub>As</sub> [2]. В случае двойной имплантации Si + P эти дефекты исчезают, а в катионной подрешетке появляются глубокие центры, связанные с комплексом V<sub>Ga</sub>-Si<sub>Ga</sub>, приводящие к появлению линии ФЛ 1.2 эВ [7]. Причиной этого эффекта может быть создаваемое ионами изовалентной примеси P отклонение от стехиометрии, приводящее к избытку элемента V группы и перераспределению амфотерной примеси Si в сторону преимущественного создания донорных состояний в узлах галлия. Это предположение подтверждается измерениями слоевой концентрации электронов.

Использование подложек GaAs, легированных индием, приводит к подавлению глубоких центров, образующихся в процессе ионной имплантации. Так, исследования ФЛ показали, что полосы излучения, связанные с дефектами Ga<sub>As</sub>, Ga<sub>i</sub>-Si<sub>As</sub> и V<sub>As</sub>-Si<sub>As</sub> в случае имплантации одного кремния и с комплексом V<sub>Ga</sub>-Si<sub>Ga</sub> в случае двойной имплантации, проявляются только при максимальных дозах вводимых примесей. Подобное явление ранее наблюдалось в полученных различными методами эпитаксиальных пленках GaAs, легированных индием [4,5]. Известно, что примесь In в GaAs электрически не активна. Однако, создаваемые атомами индия локальные напряжения в решетке могут воздействовать на точечные дефекты, такие как вакансии, междоузлия и т.д. При этом атомы индия могут действовать как центры взаимной аннигиляции пар Френкеля, предотвращая образование комплексов собственных дефектов решетки и кремния. Этот эффект должен приводить к улучшению качества кристаллической решетки и к увеличению времени жизни носителей заряда, что подтверждается увеличением интенсивности краевого излучения ФЛ. Можно было бы ожидать, что уменьшение количества образующихся комплексов приведет к увеличению степени активации доноров, однако, типичные значения концентрации глубоких центров намного меньше концентрации доноров кремния и, следовательно, слоевая концентрация электронов в случае использования нелегированных и легированных индием подложек практически одинакова.

#### 5. Заключение

Исследования электрических свойств и низкотемпературной фотолюминесценции слоев *n*-типа проводимости, полученных имплантацией ионов кремния и кремния совместно с фосфором в нелегированные и легированные индием полуизолирующие подложки GaAs показали, что двойная имплантация увеличивает степень активации доноров и обеспечивает более резкий профиль распределения легирующей примеси при больших дозах имплантации для обоих типов подложки. Обнаружено, что двойная имплантация подавляет образование глубоких уровней в анионной подрешетке, но приводит к формированию глубоких дефектов в подрешетке галлия. По-видимому,

эти явления связаны с отклонением от стехиометрии, создаваемым изовалентной примесью Р, стимулирующим образование ионами кремния мелких донорных состояний в узлах галлия. Использование подложек GaAs, легированных индием в процессе роста, не оказывает влияния на слоевую концентрацию электронов, но способствует лучшему отжигу радиационных дефектов, создающихся в процессе ионной имплантации.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

## Список литературы

- [1] F. Yuuga, H. Yamazaki, K. Watanabe, J. Osaka. *J. Appl. Phys.*, **50**, 1592 (1987).
- [2] В.С. Абрамов, И.П. Акимченко, В.А. Дравин, Н.Н. Дымова, В.В. Краснопецев, В.В. Чалдышев, Ю.В. Шмарцев. *ФТП*, **25**, 1355 (1991).
- [3] M.G. Milvidskii, V.B. Osvenskii, S.S. Shifrin. *J. Cryst. Growth*, **52**, 396 (1981).
- [4] Ю.Ф. Бирюлин, Н.В. Ганина, М.Г. Мильвидский, В.В. Чалдышев, Ю.В. Шмарцев. *ФТП*, **17**, 108 (1983).
- [5] V.V. Chaldyshev, E.V. Astrova, A.A. Lebedev, I.A. Bobrovnikova, N.A. Chernov, O.M. Ivleva, L.G. Lavrentieva, I.V. Teterkina, M.D. Vilisova. *J. Cryst. Growth*, **146**, 246 (1995).
- [6] A.A. Bergh, P.J. Dean. *Light-emitting Diodes* (Charendon Press, Oxford, 1976).
- [7] A.A. Gutkin, N.S. Averkiev, M.A. Reshchikov, V.E. Sedov. *Materials Science Forum*, **196**, 231 (1995).

Редактор В.В. Чалдышев

## Silicon and phosphorus co-implantation into undoped and indium-doped GaAs substrates

N.N. Dymova<sup>2</sup>, A.E. Kunitsyn<sup>1</sup>, A.V. Markov<sup>3</sup>,  
V.V. Chaldyshev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>A.F. Ioffe Physico-Technical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg

<sup>2</sup>Physical Institute, Russian Academy of Sciences,  
117924 Moscow

<sup>3</sup>Institute of Rare Metals,  
109017 Moscow

**Abstract** The electrical properties and low-temperature (at 4.2 K) photoluminescence of heavily doped *n*-type layers produced by silicon and silicon with phosphorus implantation into undoped and indium-doped semi-insulating Czochralski grown GaAs substrates were investigated. We have found that Si + P co-implantation results in suppression of deep levels in the anion sublattice, increase of donor activation efficiency, and sharper carrier concentration profile in both types of substrate. The use of indium-doped substrates enhances radiation defect annealing, but does not change the donor activation efficiency.