

УДК 53.023, 53.043, 53.096, 537.9

ВЛИЯНИЕ НЕИДЕАЛЬНОСТИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И УСЛОВИЙ ДИФФУЗИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ МЕЛКОЗАЛЕГАЮЩЕГО P-N ПЕРЕХОДА

Шевченко А. И., Мазинов А. С., Арутинов Н. Э.

INFLUENCE OF NONIDEALITY OF THE CRYSTAL STRUCTURE AND DIFFUSION
CONDITIONS ON THE FORMATION OF A SHALLOW P-N JUNCTION

Shevchenko A. I., Mazinov A. S., Arutinov N. E.

Crimean Federal University named V. I. Vernadsky, Simferopol, Russia
e-mail: mas@crimea.edu

Abstract. In this paper the effect of diffusion constants on the distribution profile of the dopant and the depth of the p-n junction has been considered. The base layer was monocrystalline silicon doped with boron, whose concentration was $6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. The dopant was phosphorus. The time for the diffusion process was 60 minutes, the temperature was 865°C. The diffusion coefficient depends exponentially on the temperature and on the activation energy of the diffusing impurity. Three dependencies has been shown under different conditions of the process and the different state of the initial crystal. The pre-exponential factor is the diffusion coefficient at the activation energy equal to 0 eV. For phosphorus the activation energy was determined at 3.66 eV, in turn the diffusion coefficient at zero activation energy has large ambivalence. It can vary by 90%, and a change of 50% gives a deviation of the depth of the p-n junction by 20–30%. The greatest influence on the depth of the barrier (2 times or more) is caused by changes in the activation energy and diffusion temperature. Another parameter – the initial concentration of the atoms of the alloying substance C_s , is determined by its limiting solubility. The change of C_s deflects the position of the p-n junction by 20%. Besides, the time difference in the process also has a negligible effect on the shape of the impurity distribution profile, namely, its change by 10% leads to the deviation of the depth of the p-n junction in 6%.

Keywords: diffusion, solubility limit, activation energy, diffusion coefficient, concentration distribution profile, p-n junction depth.

Введение

Одним из базовых параметров фотопреобразующих приборов является построение генерирующего потенциального барьера, которое зависит от физических параметров основного материала, примесных атомов, режимов создания и т.д. В современных фотоэлектрических батареях используются как тонкоплёночные, так и монокристаллические структуры, однако для более полного понимания специфики построения распределения барьерообразующих атомов лучше рассматривать уже отработанные процессы создания фронтальных барьеров на основе диффузии легирующей примеси в монокристалл.

Рассмотрение точности профиля распределения примесных атомов, следовательно,

и построения потенциальных барьеров, возможно на основе анализа девиации диффузионных констант [1]. Естественно, это главным образом влияет на эффективность оптоэлектронного прибора. Следовательно, для того, чтобы использовать наиболее оптимальную технологическую цепочку в производстве солнечных элементов, необходимо тщательно рассмотреть влияние диффузионных констант при тех или иных условиях получения твердотельной структуры. В связи с этим в данной работе рассматривалось влияние точности определения диффузионных констант на залегание фронтального p-n перехода фотоэлектрического преобразователя (ФЭП). Другими словами, детализируется описание того, как отклонение от неидеально-

Шевченко Алексей Иванович, ассистент кафедры радиофизики и электроники Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского; e-mail: shevshenkoai@cfuv.ru

Мазинов Алим Сеит-Аметович, канд. техн. наук, доцент кафедры радиофизики и электроники Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского; e-mail: mas@crimea.edu

Арутинов Никита Эдуардович, студент бакалавриата Физико-технического института Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского; e-mail: kintiri1997@gmail.com

сти кристаллической структуры может влиять на диффузионные константы, а те, в свою очередь, изменять распределение примесных атомов.

1. Исходный базовый кристалл кремния

Наилучший сбор носителей заряда, сгенерированных под действием оптического излучения, возможен при определённых особенностях формирования и конструкции прибора с потенциальным барьером [2].

Кроме того, оптимизация методики получения ФЭП позволит снизить затраты на его производство, значит его стоимость, являющаяся немаловажным параметром для массового производства.

После преодоления кризиса в конце 80-х – конце 90-х годов прошлого столетия, связанного с дефицитом Si как основного материала для производства ФЭП, начиная с 2008 г. началось осязаемое снижение стоимости кристаллического кремния, описываемое законом Свансона [3]. Уменьшение толщины ФЭП до 140–180 мкм и, следовательно, расхода Si [4, 5], а также использование отходов [6, 7] ещё больше снизило себестоимость готового прибора [8–10].

Такое уменьшение толщины позволило добиться лучшего токособирания носителей зарядов, как дырок, так и электронов. Дальнейшее уменьшение толщины уже не столь интересно вследствие малого коэффициента поглощения кристаллического кремния относительно аморфного. Кроме того, получение тонких пластин при большой их площади является достаточно трудоёмким процессом [11]. В качестве базового слоя, который составляет основную часть фотопреобразователя, прерогатива закрепилась за кремнием, легированным бором (p-Si(B)), с удельным сопротивлением 1–10 Ом·см [12]. Фронтальная часть представляет собой кремний, легированный фосфором (n-Si(P)) с большей концентрацией допирующей примеси относительно базового слоя.

Ещё один метод повышения тока дырок состоит в увеличении их длины свободного пробега, которая зависит от идеальности структуры применяемого кристаллического кремния. Монокристаллический кремний солнечного качества по сравнению с c-Si электронного качества характеризуется большей концентрацией дефектов [13, 14]. Кроме то-

го, дефектные центры мешают равномерному распределению легирующей примеси.

Большая степень легирования кремниевого кристалла приводит к неполному распределению примесных центров [15], коэффициент которого может достигать всего лишь 0,52.

Все вышеперечисленные обстоятельства влияют на точность расчёта глубины залегания p-n перехода при диффузионном легировании кремния.

2. Формирование фронтальной области

Диффузия донорной примеси — один из основных процессов при создании ФЭП [16]. На её скорость влияют многие факторы, в первую очередь из-за несовершенной кристаллической структуры она может меняться на три порядка [17, 18]. Описание перемещения допирующей примеси по атомной решётке легируемого вещества может быть выполнено как численно, так и аналитически. В целом, как первые, так и вторые методы характеризуются общим алгоритмом, заключающимся в экспоненциальной зависимости коэффициента диффузии от других технологических параметров. Коэффициент диффузии зависит от концентрации интегрально [19]

$$D(C) = \frac{-1/2 \int_{C_0}^{\sigma} \eta dC}{dC/d\eta},$$

здесь

$$\eta = \frac{x}{\sqrt{t}},$$

где x — глубина, t — время диффузии.

Аналитические методы мобильны и не сложно подбираются для определённых условий, тем не менее, они включают в себя среднестатистические параметры. Эти константы могут быть найдены экспериментальным путём и зависят от первичных материалов и условий процесса диффузии.

Для определения коэффициента диффузии в экспоненциальной формуле используются следующие константы: энергия активации (E_a) и коэффициент диффузии при нулевой энергии активации (D_0).

В нашем случае рассматривалась одна из современных технологических цепочек по производству фотоэлектрических преобразователей. Базовый слой — монокристаллический кремний, легированный бором с концентрацией его атомов $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, в который

диффундировали атомы фосфора. Для построения профилей распределения донорной примеси D_0 был взят $6 \text{ см}^2/\text{с}$. Время и температура загонки примеси составляли 60 мин. и $865 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно.

3. Постоянные коэффициента диффузии

Коэффициент D_0 зависит от строения решётки кристалла, т.е. от методов получения материала [1]. Точное значение данной величины определяется как предел коэффициента диффузии при температуре T , равной бесконечности или как предел коэффициента диффузии при энергии активации, равной нулю. Следовательно, экспериментально определить D_0 можно лишь аппроксимационно. Справочные данные в основном приводятся для высококачественного монокристаллического кремния и не могут быть использованы в полной мере для расчётов в материалах, имеющих ощутимую степень легирования и дефектности [1, 20].

Энергетическая константа процесса диффузии связана с энергиями, необходимыми для распространения атомов примеси и формирования примесных комплексов. Она также зависит от состояния кристалла, в который проводится диффузия. Энергия активации E_a — один из диффузионных параметров, наибольшим образом влияющих на профиль распределения примеси и глубину залегания р-п перехода из-за своего подэкспоненциального расположения.

Большое количество типов дефектов, присутствующих кристаллам технологического качества, делает процессы перемещения примеси вероятностными [21, 22]. С учётом того, что межузельные атомы и вакансии могут быть нейтральными и заряженными, коэффициент диффузии рассматривается в следующем виде [21]:

$$D = D^x + \sum_{r=1}^m (D^{-r})(n/n_i)^r + \sum_{r=1}^m (D^{+r})(n_i/n)^r, \quad (3.1)$$

здесь D^x — коэффициент диффузии для незаряженных дефектов, D^{-r} и D^{+r} — коэффициенты диффузии, присущие ионизированным дефектным состояниям, r — целое число, показывающее степень ионизации. n_i — соб-

ственная концентрация, зависящая от температуры и от ширины запрещённой зоны [1, 23].

Ниже рассматриваются три основные зависимости коэффициента диффузии от D_0 и E_a , характеризующиеся атомной структурой полупроводника, а также распределением, концентрацией и типами различных дефектных состояний. Судя по всему, последнее слово при расчёте параметров потенциальных барьеров принадлежит эмпирическим аппроксимациям, позволяющим рассчитать движение примеси с учётом первоначального состояния легируемого кристалла [1]. Например, коэффициент диффузии фосфора в собственный кремний наилучшим образом описывается следующей формулой:

$$D_i^x = 3,85 \exp\left(\frac{-3,66}{kT}\right),$$

где k — постоянная Больцмана, T — температура. В этой формуле (и последующих) предэкспоненциальный параметр D_0 (3,85) имеет размерность $\text{см}^2/\text{с}$, а экспоненциальный E_a (3,66) — эВ.

Данная зависимость при девиации параметра D_0 от $6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ до $10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, что в относительных единицах составляет 90 %, представлена графически на рис. 1. Эта величина даже может достигать значений в $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ [24]. На вставке того же графика рассмотрено влияние изменения энергии активации на 5–6 % на точность определения D .

В случае наличия примесных атомов [1]

$$D_i^2 = 44,2 \exp\left(\frac{-4,37}{kT}\right),$$

а при значительных концентрациях фосфора, что имеет место в приповерхностной области фотоэлектрического преобразователя, уже следует применять [1]

$$D_i^- = 4,44 \exp\left(\frac{-4,0}{kT}\right).$$

Особенно сложно определить данный коэффициент в случае мелкозалегającego р-п перехода. Отличия в справочных данных и учёт различных ошибок в связи с неидеальными параметрами монокристаллического кремния, используемого при производстве ФЭП [25], влияют на распределение концентрации примеси. Так например, в случае глубины залегания барьера порядком 100 нм (рис. 2) при изменении D_0 на 50 % её отклонение составляет

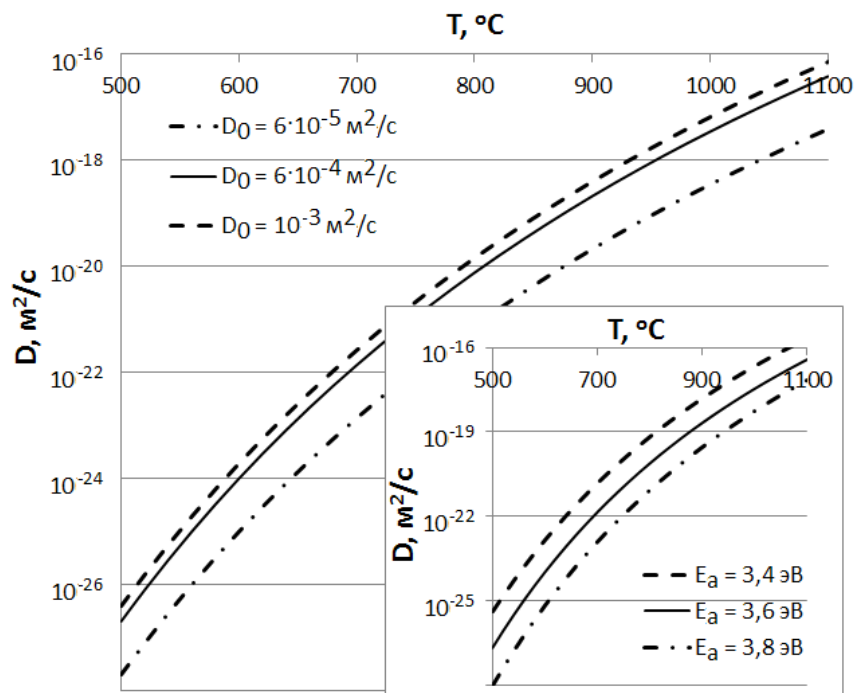


Рис. 1. Зависимость коэффициента диффузии D от температуры диффузии при различных D_0 . Вставка — зависимость D от температуры диффузии при разнй энергии активации

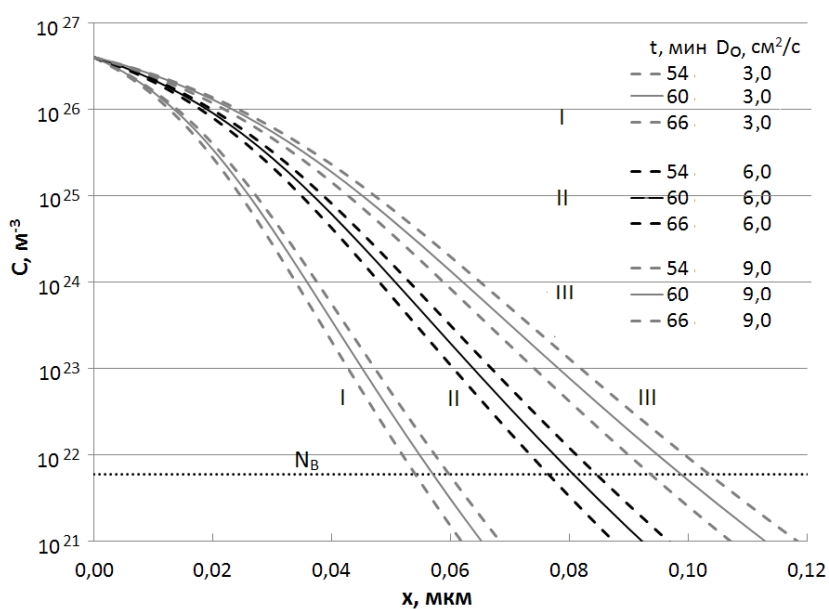


Рис. 2. Профили распределения концентрации фосфора при перелегировании $c\text{-Si}\langle B \rangle$ в случае изменения D_0 и времени загонки примеси

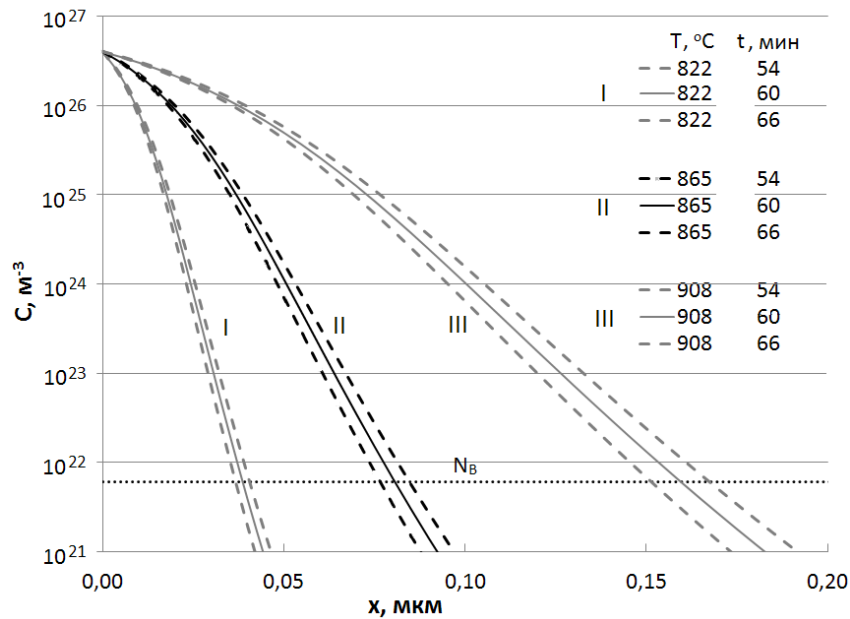


Рис. 3. Влияние температуры загонки на глубину залегания р-п перехода

20–30 %. При этом концентрация атомов донорной примеси на поверхности $4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Следовательно, процесс легирования достаточно сложен и неоднозначен, глубина залегания р-п перехода может меняться в широких пределах. Например, при температуре получения фронтального барьера в 750–850 °C, концентрации бора в легируемом кристалле $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и предельной растворимости фосфора $4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ в случае неоднозначности определения времени процесса в 10 % девиация барьера составляет 0,2–0,3 мкм при средней глубине залегания всего лишь 0,4 мкм [12].

При температуре диффузии, меньшей 900 °C, наблюдается несовпадение расчётных и экспериментально полученных результатов, которое объясняется воздействием на профиль распределения внутренних электрических полей. В результате этого влияния коэффициент диффузии может увеличиваться в 2 раза [20].

Сама температура T как параметр процесса диффузии также достаточно сильно влияет на профиль распределения примеси. Например, 5 %-е отклонение T даст неточность глубины залегания барьера от 0,05 мкм до 0,25 мкм (рис. 3).

А изменение времени проведения диффузии незначительным образом влияет на точность определения глубины залегания р-п пе-

рехода: варьирование t на 10 % приводит к отклонению расположения на 6 %.

Упрощённая вакансионная модель (3.1) может быть использована при высоких температурах загонки примеси (более 1000 °C). При таких температурах концентрация вакансий составляет $10^{15}–10^{16} \text{ см}^{-3}$ [18, 26]. Поэтому при высокотемпературном диффузионном легировании энергия активации может быть точно определена 3,66 эВ.

Как видно из графиков (рис. 4), энергия активации при изменении всего лишь на 5 %, меняет глубину залегания р-п перехода более чем в 2 раза (при увеличении E_a от 3,66 эВ до 3,84 эВ уменьшает глубину с 0,08 мкм до 0,025 мкм) [27].

4. Предел растворимости донорной примеси

Ещё одной константой, влияющей на профиль легирования полупроводниковой твёрдотельной структуры, является концентрация диффузанта на границе полупроводника и источника примеси. В связи с этим для описания процесса диффузии используется такая постоянная, как предельная растворимость диффундирующего вещества в материале, обозначаемая C_s . Она зависит от следующих величин: концентрация вакансионных состояний в кристалле и энергия связи его атомов и атомов примеси [26, 28, 29]. Для нахождения точных значений последних пара-

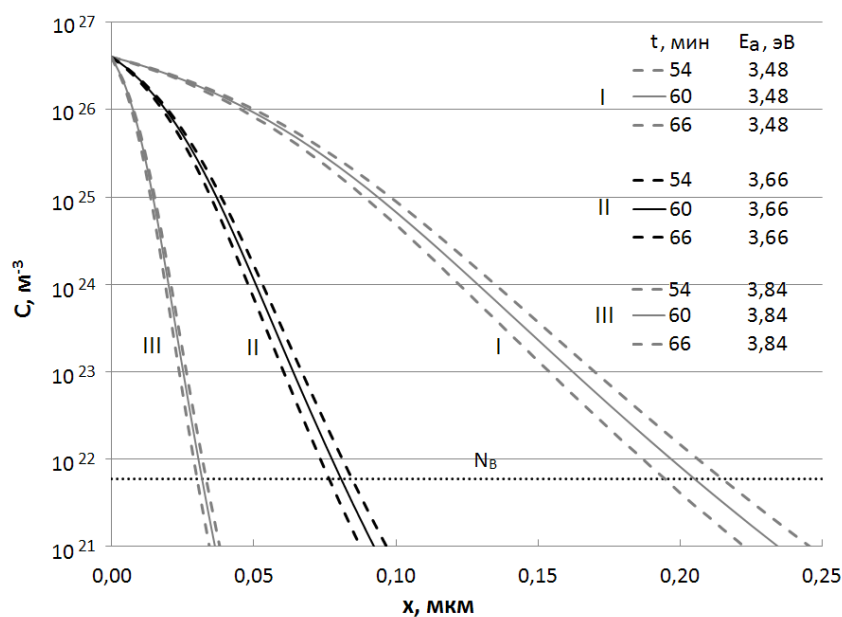


Рис. 4. Профиль фосфора в зависимости от неоднозначности определения энергии активации и времени

метров применяют специальные модельные подходы [21]. По аналогии с другими константами диффузионного процесса для определения C_s необходимо учитывать электроотрицательность химических элементов. С учётом такого большого количества параметров, оказывающих влияние на величину предельной растворимости, она имеет некий вероятностный параметр, а именно зависимость как от первоначального состояния базового кристалла, так и условий образования фосфоросиликатного стекла и распределения температуры во время загонки примеси. В свою очередь профили температуры экспериментально выбираются на заводах и держатся в секрете.

Принимая во внимание общие зависимости для C_s , точность определения предела растворимости лежит на уровне одного порядка. В этом случае глубина залегания барьера может меняться на 0,02 мкм (рис. 5) [26].

Заключение

Таким образом, точность теоретического построения профиля встроенного поля — многокомпонентная задача, зависящая от множества начальных условий, определяемых экспериментальными константами. При этом стоит отметить, что самое большое влияние на неопределённость расчётной геометрии и глубины залегания барьера оказывает неоднозначность определения энергии активации:

при 5 % отклонении от среднего значения глубина залегания меняется более чем в 2 раза. Почти так же сильно меняет глубину залегания и температурный режим загонки примеси (с 0,16 мкм до 0,08 мкм при изменении на 5 %).

Точность определения других констант менее ощутима, хотя также важна, в особенности для построения наноразмерных переходов. Коэффициент D_0 при изменении в 2 раза уменьшает / увеличивает глубину залегания лишь на 20–30 % в случае её значений около 80–100 нм. Предел растворимости незначительно меняет глубину залегания p-n перехода, изменение C_s на порядок отклоняет расположение барьера лишь на 20 %. А изменение времени загонки примеси на 10 % приводит к девиации расположения барьера на 6 %.

Литература

1. VLSI technology / Ed. by S.M. Sze. NY.: McGraw-Hill, 1983. 676 p. (Имеется перевод: Пирс К., Адамс А., Кац Л. [и др.]. Технология СБИС. Кн.1 / Под ред С. Зи. Пер. с англ. В.М. Звероловлева, В.Н. Лейкина, В.Б. Петрова [и др.]. М.: Мир, 1986. 404 с.).
2. Богатов Н.М. Распределение заряда в резком несимметричном равновесном p-n переходе // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2016. № 3. С. 12–17.

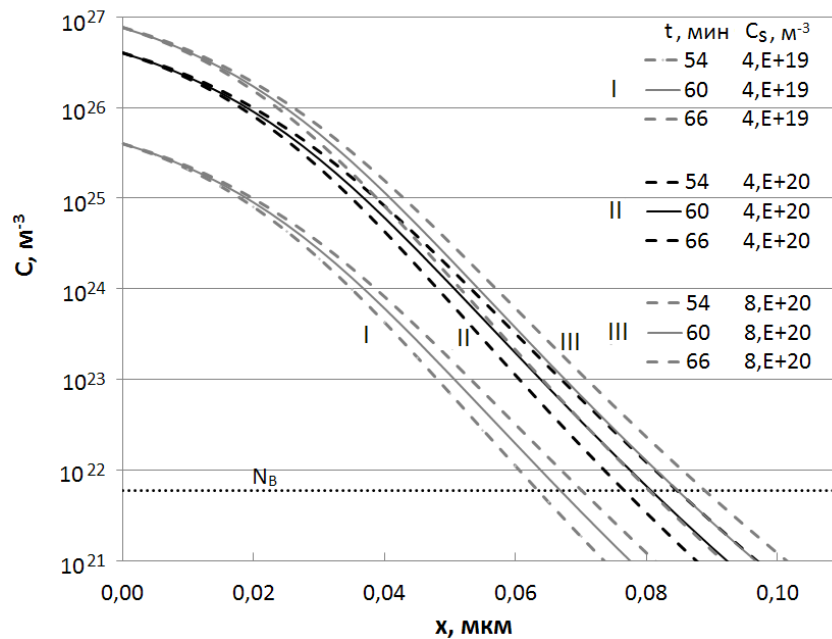


Рис. 5. Влияние C_s на глубину расположения барьера при диффузии фосфора в монокристалл кремния

- Swanson R.M. A vision for crystalline silicon photovoltaics // Progress in photovoltaics. 2006. Vol. 14. Iss. 5. P. 443–453.
- Deambi S. From sunlight to electricity: A practical handbook on solar photovoltaic applications. New Delhi: TERI, 2015. 172 p.
- Saga T. Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production // NPG Asia Materials. 2010. Vol. 2. No. 3. P. 96–102. DOI: 10.1038/asiamat.2010.82
- Алиев Р., Олимов М., Мухтаров Э., Алиева Ж. Процесс формовки пластин поликристаллического кремния из порошкового сырья и анализ примесного состава их поверхности // ФИП. 2011. Т. 9. № 1. С. 55–59.
- Мазинов А.С., Шевченко А.И., Воскресенский В.М. [и др.]. Наноструктурированные полупроводники, полученные порошковым методом // Учёные записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Серия «Физико-математические науки». 2014. Т. 27 (66). № 2. С. 107–114.
- Fraas L.M. Low-cost solar electric power. Cham: Springer, 2014. 181 p.
- Voxwell M. The solar electricity handbook – 2017 edition: A simple, practical guide to solar energy – designing and installing solar photovoltaic systems. Birmingham: Greenstream Publishing, 2017. 178 p.
- Jordan P.G. Solar energy markets: An analysis of the global solar industry. Amsterdam: Academic Press, 2013. 158 p.
- Мужаев Б.Н., Бетекбаев А.А., Калыгулов Д.А. [и др.]. Исследования процессов получения кремния и разработка технологий изготовления солнечных элементов // ФТП. 2015. Т. 49. Вып. 10. С. 1421–1428.
- Мазинов А., Писаренко Л., Шевченко А. Девиация диффузионных констант и её влияние на профиль мелко залегающего р-п перехода // Техническая электродинамика: тем. вып. «Силовая электроника и энергоэффективность». 2012. Ч. 1. С. 204–208.
- Mazinov A., Shevchenko A., Bahov V. Quantum interactions of optical radiation with the defect centres in the tails of the forbidden band of amorphous materials // Optica Applicata. 2014. Vol. 44. No. 2. P. 327–335.
- Mazinov A.S., Shevchenko A.I., Terukov E.I. The influence of defects on the energetic spectrum of noncrystalline semiconductors // JNO. 2015. Vol. 9. No. 6. P. 778–782.
- Швец Е.Я., Головки Ю.В. Зависимость коэффициента распределения примеси при кристаллизации кремния от степени легирования // Электроника и связь. 2008. № 1–2 (42–43). С. 14–16.
- Голотюк В.Н., Мариненко А.А., Шмырева А.Н. Мультикристаллический кремний в технологии фотоэлектрических преобразователей // Электроника и связь. 2008. № 6 (47). С. 15–23.
- Баранский П.И., Клочев В.П., Потыкевич И.В. Полупроводниковая электроника. Свойства материалов: Справочник. Киев: Наукова думка, 1975. 704 с.

18. Александров О.В. Модель высоко- и низкотемпературной диффузии фосфора в кремнии по дуальному парному механизму // ФТП. 2001. Т. 35. Вып. 11. С. 1289–1298.
19. Палатник А.С., Сорокин В.К. Материаловедение в электронике. М.: Энергия, 1978. 280 с.
20. Случинская И.А. Основы материаловедения и технологий полупроводников. М.: Наука, 2002. 378 с.
21. Александров О.В., Афонин Н.Н. Особенности сегрегационного перераспределения фосфора при термическом окислении сильно легированных слоев кремния // ФТП. 2005. Т. 39. Вып. 6. С. 647–654.
22. Матаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках. М.: Мир, 1974. 464 с.
23. Горнушкина Е.Д., Малкович Р.Ш. Диффузия примеси в полупроводнике в двух состояниях, различающихся коэффициентами диффузии и степенью ионизации примесных атомов // ФТП. 1995. Т. 29. Вып. 5. С. 908–923.
24. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. [и др.]. Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
25. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: теория и эксперимент / Пер. с англ. Под ред. М.М. Колтуна. М.: Энергоатомиздат, 1987. 280 с. [Fahrenbruch A., Bube R. Fundamentals of solar cells. Photovoltaic solar energy conversion. 1st ed. NY: Academic Press, 1983. 580 p.]
26. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. М.: Радио и связь, 1992. 320 с.
27. Мазинов А.С., Шевченко А.И., Быков М.А. Асимметричность плотности распределения объёмного нескомпенсированного заряда на границе металлургического p-n перехода // Журнал нано- и электронной физики. 2012. Т. 4. № 3. С. 03026-1–03026-4.
28. Sze S.M. Physics of the semiconductor devices. NY.: John Wiley & Sons, 1981. 880 p. (Имеется перевод: Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1. / Под ред. Р.А. Сурица. Пер. с английского В.А. Гергеля, В.В. Ракина. М.: Мир, 1984. 456 с.)
29. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. М.: Радио и связь, 1991. 528 с.
30. *sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2016, no. 3, pp. 12–17. (In Russian)
31. Swanson R.M. A vision for crystalline silicon photovoltaics. *Progress in photovoltaics*, 2006, vol. 14, iss. 5, pp. 443–453.
32. Deambi S. *From sunlight to electricity: A practical handbook on solar photovoltaic applications*. New Delhi, TERI, 2015, 172 pp.
33. Saga T. Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production. *NPG Asia Materials*, 2010, vol. 2, no. 3, pp. 96–102. DOI: 10.1038/asiamat.2010.82
34. Aliyev R., Olimov M., Muhtarov E., Aliyeva Zh. Protsess formovki plastin polikristallicheskogo kremniya iz poroshkovogo syrya i analiz primesnogo sostava ih poverhnosti [The process of forming of polycrystalline silicon wafers from powdered raw materials and analyzing the impurity composition of their surface]. *Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti* [Physical surface engineering], 2011, vol. 9, no. 1, pp. 55–59. (In Russian)
35. Mazinov A.S., Shevchenko A.I., Voskresenskiy V.M. [et al.]. Nanostrukturirovannyye poluprovodniki, poluchennyye poroshkovym metodom [Nanostructured semiconductors obtained by the powder method]. *Uchonyye zapiski Tavricheskogo natsionalnogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Seriya "Fiziko-matematicheskiye nauki"* [Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series "Physics and Mathematics Sciences"]. 2014, vol. 27 (66), no. 2, pp. 107–114. (In Russian)
36. Fraas L.M. *Low-cost solar electric power*. Cham, Springer, 2014, 181 pp.
37. Boxwell M. *The solar electricity handbook – 2017 edition: A simple, practical guide to solar energy – designing and installing solar photovoltaic systems*. Birmingham, Greenstream Publishing, 2017, 178 pp.
38. Jordan P.G. *Solar Energy Markets: An Analysis of the Global Solar Industry*. Amsterdam, Academic Press, 2013, 158 pp.
39. Mukashev B.N., Betekbaev A.A., Kalygulov D.A. [et al.]. Study of silicon production processes and development of solar-cell fabrication technologies. *Semiconductors*, 2015, vol. 49, no. 10, pp. 1375–1382.
40. Mazinov A., Pisarenko L., Shevchenko A. Deviatyaya diffuzionnyh constant i yeyo vliyaniye na profil melko zalegayushchego p-n perehoda [Deviation of diffusion constants and its effect on the profile of a shallow p-n junction]. *Tekhnicheskaya elektrodinamika: tem. vyp. "Silovaya elektronika i energoeffektivnost"* [Technical electrodynamics: thematic issue "Power Electronics and Energy Efficiency"], 2012, vol. 1, pp. 204–208. (In Russian)
41. Mazinov A., Shevchenko A., Bahov V. Quantum interactions of optical radiation with the

References

1. Sze S.M. (Ed.) *VLSI technology*. NY, McGraw-Hill, 1983, 676 p.
2. Bogatov N.M. Raspredeleniye zaryada v rezkom nesimmetrichnom n-p perehode [The charge distribution in sharp asymmetrical equilibrium n-p-junction]. *Ekologicheskij vestnik nauchnykh tseftrov Chernomorskogo ekonomicheskogo*

- defect centres in the tails of the forbidden band of amorphous materials. *Optica Applicata*, 2014, vol. 44, no. 2, pp. 327–335.
14. Mazinov A.S., Shevchenko A.I., Terukov E.I. The influence of defects on the energetic spectrum of noncrystalline semiconductors. *JNO*, 2015, vol. 9, no. 6, pp. 778–782.
 15. Shvets Ye.Ya., Golovko Yu.V. Zavisimost koefitsienta raspredeleniya primesi pri kristallizatsii kremniya ot stepeni legirovaniya [The dependence of the impurity distribution coefficient for the crystallization of silicon on the degree of doping]. *Elektronika i svyaz* [Electronics & Communications]. 2008, vol. 1–2 (42–43), pp. 14–16. (In Russian)
 16. Golotyuk V.N., Marinenko A.A., Shmyryova A.N. Multikristallicheskiy kremniy v tehnologii fotoelektricheskikh preobrazovateley [Multicrystalline silicon in photovoltaic technology]. *Elektronika i svyaz* [Electronics & Communications]. 2008, vol. 6 (47), pp. 15–23. (In Russian)
 17. Baranskiy V.I., Klochev V.P., Potykevich I.V. *Poluprovodnikovaya elektronika. Svoystva materialov: Spravochnik* [Semiconductor Electronics. Properties of materials: Reference book]. Kiev, Naukova dumka Pub., 1975, 704 p. (In Russian)
 18. Alexandrov O.V. A model of high- and low-temperature phosphorus diffusion in silicon by a dual pair mechanism. *Semiconductors*, 2001, vol. 35, no. 11, pp. 1231–1241.
 19. Palatnik L.S., Sorokin V.K. *Materialovedeniye v elektronike* [Material Science in Electronics]. Moscow, Energiya, 1978, 280 p. (In Russian)
 20. Sluchinskaya I.A. *Osnovy materialovedeniya i tekhnologiy poluprovodnikov* [Fundamentals of materials science and semiconductor technologies]. Moscow, Nauka Pub., 2002, 378 p. (In Russian)
 21. Alexandrov O.V., Afonin N.N. Specific features of the segregation-related redistribution of phosphorus during thermal oxidation of heavily doped silicon layers. *Semiconductors*, 2005, vol. 39, no. 6, pp. 615–622.
 22. Matare G. *Elektronika defektov v poluprovodnikah* [Electronics of defects in semiconductors]. Moscow, Nauka Pub., 1974, 464 p. (In Russian)
 23. Gornushkina Ye.D., Malkovich R.Sh. Diffuziya primesi v poluprovodnike v dvuh sostoyaniyakh, razlichayuschihsiya koefitsientami diffuzii i stepenyu ionizatsii primesnykh atomov [Diffusion of an impurity in a semiconductor in two states, differing by the diffusion coefficients and the degree of ionization of impurity atoms]. *Fizika i tehnika poluprovodnikov* [Physics and techniques of semiconductors], 1995, vol. 29, no. 5, pp. 908–923. (In Russian)
 24. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskiy A.M. [et al.]. *Fizicheskiye velichiny. Spravochnik* [Physical quantities. Reference book]. Moscow, Energoatomizdat Pub., 1991, 1232 p. (In Russian)
 25. Fahrenbruch A., Bube R. *Fundamentals of solar cells. Photovoltaic solar energy conversion*. 1st ed., NY, Academic Press, 1983. 580 p.
 26. Berezin A.S., Mochalkina O.P. *Tehnologiya i konstruirovaniye integralnykh mikroshem* [Technology and design of integrated microcircuits], Moscow, Radio i svyaz Pub., 1992, 320 p. (In Russian)
 27. Mazinov A.S., Shevchenko A.I., Bykov M.A. Asimmetrichnost plotnosti raspredeleniya obyomnogo neskompensirovannogo zaryada na granitse metallurgicheskogo p-n perehoda [The asymmetry of the distribution density volume uncompensated charge at the metallurgical p-n junction]. *Zhurnal nano- i elektronnoy fiziki* [Journal of nano- and electronic physics], 2012, vol. 4, no. 3, pp. 03026-1–03026-4. (In Russian)
 28. Sze S.M. *Physics of the semiconductor devices*, NY, John Wiley & Sons, 1981, 880 p.
 29. Gotra Z.Yu. *Tehnologiya mikroelektronnykh ustroystv: Spravochnik* [Technology of microelectronic devices: Reference Book]. Moscow, Radio i svyaz, 1991, 528 p. (In Russian)