

Таким образом, исследование акустоэлектрического эффекта дает возможность дополнительного исследования механизмов проводимости с переменной длиной прыжка и эффективной размерности прыжковой системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] H. Fritzsche. Phys. Rev. B, 29, 6672 (1984).
- [2] G. Weinreich, T. M. Sanders, H. G. White. Phys. Rev. 114, 33 (1959).
- [3] Yu. M. Galperin, Jin Anjun, B. I. Shklovskii. Phys. Rev. B, 44, 5497 (1991).
- [4] F. R. Shapiro, D. Adler. J. Non-Cryst. Sol., 74, 189 (1985).
- [5] F. R. Shapiro, D. Adler. J. Non-Cryst. Sol., 77-78, 139 (1985).
- [6] M. Grünevald, P. Thomas. Phys. St. Sol. B, 94, 125 (1979).
- [7] D. Monroe. Phys. Rev. Lett., 54, 146 (1985).
- [8] Н. Мотт, Э. Дэвис. Электронные процессы в некристаллических веществах, 472. М. (1974).

Редактор Л. В. Шаронова

ФТП, том 26, вып. 11, 1992

ОБ АКЦЕПТОРНЫХ УРОВНЯХ ДИВАКАНСИИ В КРЕМНИИ

Ф. П. Коршунов, В. П. Маркевич, И. Ф. Медведева, Л. И. Мурин

Институт физики твердого тела и полупроводников Белорусской академии наук, 220726, Минск, Беларусь
(Получено 1.04.1992. Принято к печати 27.05.1992)

Дивакансия (W) является одним из наиболее изученных радиационных дефектов (РД) в кремнии [1]. Она может находиться в четырех зарядовых состояниях (W^+ , W^0 , W^- и W^{--}) и вносит соответственно один донорный и два акцепторных уровни в запрещенную зону Si. Положение данных уровней определялось с помощью различных методов, однако наиболее точными считаются данные, полученные методом релаксационной спектроскопии DLTS [2-7]. Согласно [2-7], дивакансии соответствуют уровни $E_v + (0.21-0.25)$, $E_c - (0.39-0.41)$ и $E_c - (0.21-0.23)$ эВ. Это заключение основывается на следующих экспериментальных фактах: одинаковой эффективности введения (η) всех трех уровней независимо от примесного состава облучаемых кристаллов, а также идентичном поведении этих уровней при отжиге; более высокой пороговой энергии (E_d) появления данных уровней по сравнению с пороговой энергией образования пар Френкеля; соответствии полученных значений η , $T_{\text{анн}}$ и E_d аналогичным величинам для W , определенным ранее методом ЭПР [8]. В то же время в ряде работ [9-12], в которых энергетический спектр РД в кремнии изучался методом эффекта Холла, принадлежность уровня $E_c - 0.21$ эВ дивакансии была поставлена под сомнение. Авторами [9-12] наблюдалась зависимость эффективности введения данного уровня от примесного состава (метода получения) кристаллов Si. В частности, в [9, 10] отмечается, что РД с уровнем $E_c - 0.21$ эВ вообще не образуются в кристаллах, полученных методом зонной плавки. Кроме того, наблюдалось несовпадение концентраций уровней $E_c - 0.21$ и $E_c - 0.4$ эВ, а также их различное поведение при отжиге.

С целью выяснения возможных причин вышеуказанных различий в результатах, получаемых методами DLTS и эффекта Холла, мы провели более детальное исследование электрических свойств кристаллов *n*-Si, облученных γ -квантами ^{60}Co (когда эффективность введения W очень низка) и быстрыми электронами

Материал	Вид облучения	$N_p, \text{см}^{-3}$	$N_O, \text{см}^{-3}$	$N_C, \text{см}^{-3}$	$\eta = N/\phi, \text{см}^{-1}$			
					$E_c - 0.12, \text{эВ}$	$E_c - 0.18, \text{эВ}$	$E_c - 0.21, \text{эВ}$	$E_c - 0.4, \text{эВ}$
Зонный	γ	$6 \cdot 10^{13}$	$< 10^{16}$	$\sim 5 \cdot 10^{15}$	$3.9 \cdot 10^{-4}$	$\ll 5 \cdot 10^{-6}$	$\leq 5 \cdot 10^{-6}$	$8.0 \cdot 10^{-4}$
»	e	»	»	»	$1.1 \cdot 10^{-1}$	—	$2 \cdot 10^{-2}$	$1.9 \cdot 10^{-1}$
Тянутый	γ	$5 \cdot 10^{13}$	$6 \cdot 10^{17}$	$\sim 1 \cdot 10^{16}$	$4.1 \cdot 10^{-4}$	$4.2 \cdot 10^{-4}$	—	$\sim 1 \cdot 10^{-5}$
»	e	»	»	»	$1.1 \cdot 10^{-1}$	$\sim 1.1 \cdot 10^{-1}$	$\sim 2 \cdot 10^{-2}$	$2.1 \cdot 10^{-2}$

с $E = 4$ МэВ (когда η_w сопоставима с таковой для примесно-дефектных комплексов).

Образцы и методика исследований

Исследовались монокристаллы n -Si ($\rho = 70 \div 80 \text{ Ом} \cdot \text{см}$), полученные методом бестигельной зонной плавки в вакууме (зонные) и методом Чохральского (тянутые). Концентрация фосфора (N_p) в исследуемых образцах, а также концентрации кислорода (N_O) и углерода (N_C), определенные оптическим методом, приведены в таблице. Образцы облучались γ -квантами ^{60}Co и быстрыми электронами при $T \sim 200$ К. Положение энергетических уровней и концентрации радиационных дефектов определялись из анализа температурных зависимостей концентрации носителей тока (ТЗКН). Определение параметров РД проводилось как с использованием уравнения электронной нейтральности, так и по дифференциальной методике [13], согласно которой положение уровней и концентрации дефектов находится из зависимостей величины $Y = kT (dn/dF)$ от $F = E_c - E_F$ (n — концентрация свободных электронов, E_F — уровень Ферми). Если уровни дефектов расположены достаточно далеко друг от друга ($> 5 kT$), то зависимость $Y(F)$ имеет вид спектральных полос. При этом ординаты максимумов соответствуют концентрациям дефектов, уменьшенным в 4 раза ($Y_m = 0.25 N_D$), а абсциссы максимумов — положению их энергетических уровней ($F_m = E_c - E_D$).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Как известно [14, 15], основными дефектами, образующимися в кристаллах n -Si при облучении γ -квантами ^{60}Co при пониженных температурах ($T_{\text{irr}} \leq 273$ К), являются A - и E -центры, а также межузельные атомы углерода (C_i). При этом относительные эффективности введения A - и E -центров определяются соотношением концентраций кислорода и фосфора, а эффективность введения C_i , как правило, совпадает с суммарной эффективностью введения вакансионных ловушек.

Проведенные эксперименты показали, что вышеуказанные закономерности радиационного дефектообразования выполнялись и для исследуемых кристаллов. На рис. 1, а, с и рис. 2, а, с показаны ТЗКН и зависимости $Y(F)$ для кристаллов, облученных γ -квантами ^{60}Co при $T \sim 200$ К. Как видно из представленных данных, основными РД в кристаллах зонного кремния являются центры с уровнями $\sim E_c - 0.12$ (C_i) и $\geq E_c - 0.4$ (E -центры), в кристаллах тянутого Si — центры с уровнем $\sim E_c - 0.12$ (C_i) и $\sim E_c - 0.18$ эВ (A -центры). Эффективности введения этих дефектов приведены в таблице. Отметим очень низкую скорость генерации дефектов с уровнями $\sim E_c - 0.18$ в зонном Si и $\geq E_c - 0.4$ эВ в тянутом Si. Отсутствие A -центров в зонном Si обусловлено чрезвычайно низким содер-

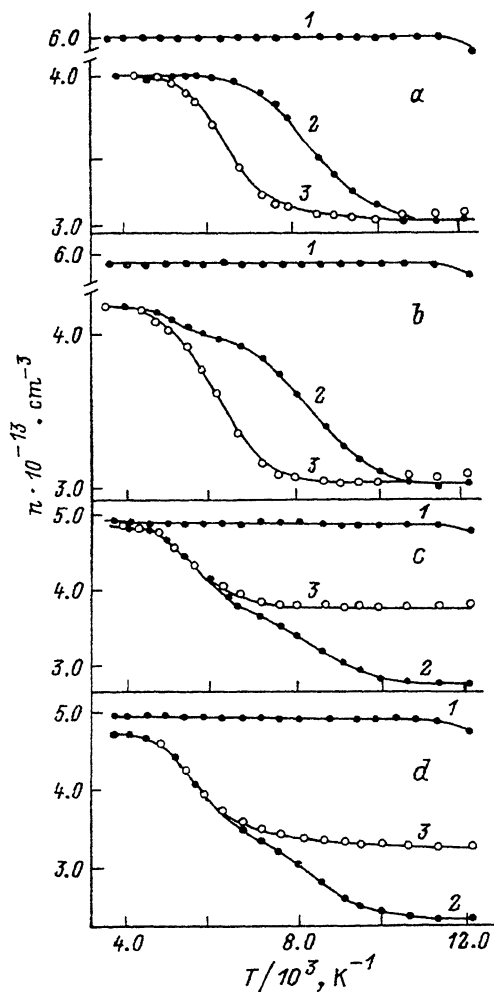


Рис. 1. Температурные зависимости концентрации носителей тока в кристаллах зонного (*a*, *b*) и тянутого (*c*, *d*) кремния. 1 — до облучения; *a*, *b*: 2 — после облучения γ -квантами ^{60}Co при $T \sim 200$ К ($\Phi = 2.5 \cdot 10^{16}$ кв/см 2); *c*, *d*: 2 — после облучения электронами с $E = 4$ МэВ при $T \sim 200$ К ($\Phi = 1 \cdot 10^{14}$ эл/см 2), 3 — после 30-минутного отжига при $T = 350$ К.

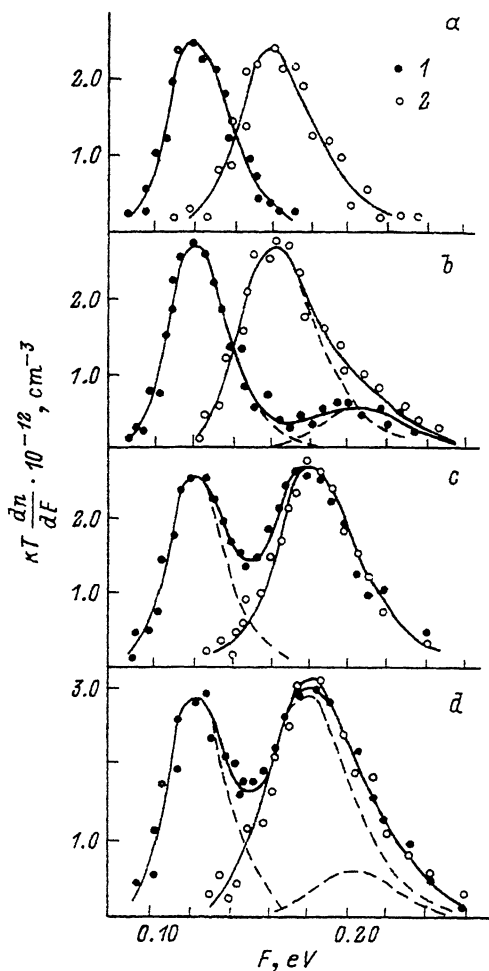


Рис. 2. Зависимости величины $Y = kT (dn/dF)$ от $F = E_c - E_F$, полученные путем численного дифференцирования ТЗКН, изображенных на рис. 1. 1 — после облучения, 2 — после отжига при 350 К. Сплошные линии — расчетные зависимости $Y(F)$. Штриховыми линиями показаны парциальные вклады отдельных дефектов. При расчетах факторы вырождения для всех центров принимались равными 1.

жанием растворенных атомов кислорода ($N_O \leq 10^{13}$ см $^{-3}$) в кристаллах, получаемых методом зонной плавки в вакууме, что является хорошо известным фактом [16]. Отсутствие в заметных концентрациях глубоких центров в тянутом Si связано с очень низкой скоростью генерации как E -центров ($N_O \gg N_F$), так и дивакансий (средняя энергия комптоновских электронов составляет ~ 0.6 МэВ, т. е. незначительно превосходит пороговую энергию образования W), что также хорошо согласуется с результатами других исследований [5, 7, 14].

ТЗКН и зависимости $Y(F)$ для кристаллов, облученных электронами, приведены на рис. 1, *b*, *d* и рис. 2, *b*, *d*. Отличительной особенностью данного вида облучения (по сравнению с γ -квантами ^{60}Co) является следующее.

а) В зонном кремнии наряду с C_i и глубокими центрами в заметных концентрациях вводятся дефекты с уровнем $\sim E_c - 0.21$ эВ. Эффективность введения этих центров составляет 15—20% от эффективности введения C_i (см. таблицу).

б) В тянутом кремнии в заметных концентрациях вводятся дефекты с глубокими уровнями ($> E_c - 0.4$ эВ). Эффективность их введения близка к таковой для центров с уровнем $E_c - 0.21$ эВ в зонном Si. Сделать однозначный вывод об образовании дефектов с уровнем $E_c - 0.21$ эВ в тянутом Si достаточно сложно. Однако наилучшая подгонка расчетных и экспериментальных ТЗКН и зависимостей $Y(F)$ (рис. 1 и 2) достигалась при условии введения этих центров с такой же эффективностью, как и в зонном Si.

Таким образом, полученные результаты хорошо согласуются с данными, полученными методом DLTS [2-7], о поведении уровней $E_c - 0.21$ и $E_c - 0.4$ эВ: их эффективности введения совпадают, не зависят от примесного состава кристаллов и резко возрастают с повышением энергии бомбардирующих частиц. Тем самым еще раз подтверждается принадлежность этих уровней акцепторным состояниям дивакансии.

Что касается «ненаблюдаемости» методом эффекта Холла дефектов с уровнем $E_c - 0.21$ эВ в зонном *n*-Si, облученном при $T \geq 300$ К [9, 10], то это, вероятно всего, связано со сложностью определения по ТЗКН концентраций дефектов с близкорасположенными уровнями. Об этом наглядно свидетельствуют представленные на рис. 1 (кривые 3) и рис. 2 (кривые 2) ТЗКН и зависимости $Y(F)$ для кристаллов, отожженных при $T = 350$ К (аналогичные зависимости наблюдались и для кристаллов, облученных при этой же температуре). В этом случае, независимо от вида облучения, на зависимостях $Y(F)$ наблюдается лишь один пик вблизи $E_c - 0.16$ для зонного Si и вблизи $E_c - 0.18$ эВ для тянутого Si, причем амплитуда пика в обоих материалах примерно одинакова. Связано это в первую очередь с различным механизмом отжига межузельных атомов углерода в кристаллах зонного и тянутого Si. В зонном Si, где $N_C \gg N_O$, основным стоком для C_i является углерод замещения, и при отжиге C_i в такой же концентрации образуются комплексы $C_i - C_s$ (уровень $E_c - 0.16$ эВ) [14, 17, 18]. В тянутом Si, где $N_O \gg N_C$, практически все C_i захватываются кислородом с образованием комплексов $C_i - O_i$, донорный уровень которых расположен у $E_v + 0.35$ эВ и по электрическим измерениям в *n*-Si не наблюдается [14, 17]. Поскольку C_i при облучении вводились с такой же эффективностью, как и основные вакансионные ловушки, после отжига при 350 К концентрация комплексов $C_i - C_s$ в зонном Si (пик у $E_c - 0.16$ эВ) практически совпадает с концентрацией А-центров в тянутом Si (пик у $E_c - 0.18$ эВ). Наличие дивакансий (уровень $E_c - 0.21$ эВ) в кристаллах, облученных электронами, приводит лишь к некоторому изменению формы пиков, и соответственно точное определение концентрации W весьма затруднено. Более того, в кристаллах с другим соотношением концентраций кислорода и углерода возможно одновременное присутствие комплексов $C_i - C_s$ и А-центров, что еще более усложняет задачу определения концентрации W по уровню $E_c - 0.21$ эВ. Как показано в настоящей работе, корректное определение концентрации дефектов с уровнем $E_c - 0.21$ эВ из измерений эффекта Холла возможно лишь в «бескислородных» кристаллах Si, облученных при пониженных температурах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. С. Вавилов, В. Ф. Киселев, Б. Н. Мукашев. Дефекты в кремнии и на его поверхности, 216. М. (1990).
- [2] A. O. Ewvaraye, E. Sun. J. Appl. Phys., 47, 3776 (1976).
- [3] L. C. Kimerling. Inst. Phys. Conf. Ser. N 31, 221. London—Bristol. (1977).
- [4] J. Krynicki, J. C. Bourgoin, G. Vassal. Rev. Phys. Appl., 14, 481 (0000).
- [5] S. D. Brotherton, P. Bradley. J. Appl. Phys., 53, 5720 (1982).
- [6] А. В. Васильев, Л. С. Смирнов, С. С. Шаймеев. ФТП, 20, 737 (1986).

- [7] P. V. Kuchinskii, V. M. Lomako. Phys. St. Sol. (a), 102, 653 (1987).
 [8] G. D. Watkins, J. W. Corbett. Phys. Rev., 138, 543 (1965).
 [9] П. Ф. Лугаков, В. В. Шуша. Изв. АН БССР, Сер. физ.-мат. наук, № 6, 80 (1980).
 [10] L. A. Kazakevich, V. I. Kuznetsov, P. F. Lugakov. Rad. Eff. Lett., 87, 147 (1986).
 [11] Б. В. Шемаев. ФТП, 17, 1963 (1983).
 [12] Б. В. Шемаев. Автореф. канд. дисс. М. (1987).
 [13] H. J. Hoffmann. Appl. Phys., 19, 307 (1979).
 [14] А. Г. Литвинко, Л. Ф. Макаренко, Л. И. Мурин, В. Д. Ткачев. ФТП, 14, 776 (1980).
 [15] Ф. П. Коршунов, В. П. Маркевич, И. Ф. Медведева, Л. И. Мурин. Радиационное материаловедение, т. 4, 161. Харьков (1990).
 [16] A. Mayer. Sol. St. Techn., 15, 38 (1972).
 [17] В. П. Маркевич, Л. И. Мурин. ФТП, 22, 911 (1988).
 [18] L. W. Song, X. D. Zhan, B. W. Benson, G. D. Watkins. Phys. Rev. B, 42, 5765 (1990).

Редактор В. В. Чалдышев

ФТП, том 26, вып. 11, 1992

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОК $Pb_{1-x}Sn_xS(Na)$

Л. Г. Бакуева, И. Б. Захарова, В. И. Ильин, С. Ф. Мусихин

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
 195251, Санкт-Петербург, Россия
 (Получено 22.05.1992. Принято к печати 27.05.1992)

Изовалентно-акцепторное легирование сульфида свинца [1] позволяет реализовать компенсацию дырочной проводимости материала и получать пленки состава $Pb_{1-x}Sn_xS(Na)$, перспективные для использования в виде фоточувствительных элементов гибридных инфракрасных приборов с зарядовой связью. Ранее [2] мы сообщали, что такие пленки сразу после получения без активирующего отжига имеют высокую фоточувствительность. В данной работе рассматриваются зависимости фотоэлектрических характеристик пленок от структуры и фазового состава и природа аномального спектрального распределения фоточувствительности пленок.

Исследуемые пленки получали методом вакуумной конденсации из изовалентно-акцепторно легированной шихты в квазизамкнутом объеме. В качестве подложек использовали слюду-мусковит и термически окисленный кремний с толщиной окисла 0.1—0.8 мкм. Толщина полученных пленок составляла 1.0—5.0 на слюде и 0.5—1.0 мкм на окисленном кремнии. Пленки конденсировали при температуре подложки 400—580 К и значениях пересыщения пара $\Psi \cong 10^3$ — 10^7 . Имеются данные [3] о возможном обеднении оловом пленок на основе твердых растворов $A^{IV}B^{VI}$ в процессе вакуумного напыления. Поэтому мы провели количественный анализ содержания олова в шихте и в конденсированном материале методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Результаты анализа показали, что состав пленки по олову соответствует составу исходной шихты с отклонением не более 20%.

Структуру и фазовый состав неактивированных пленок $Pb_{1-x}Sn_xS(Na)$ исследовали методами рентгено-фазового анализа, растровой электронной микроскопии и оже-электронной спектроскопии. Пленки на слюде монокристаллические, пленки на SiO_2 имеют поликристаллическую структуру с размером зерна 0.5—1.0 мкм и текстурой по направлению [100]. Измерения электрофизических параметров пленок гальваномангнитными и термоэлектрическими методами показали, что тип проводимости и параметры объемных образцов шихты и мо-