

Исследование фотоемкости диодов из кремния, легированного ванадием

© Х.Т. Игамбердиев, А.Т. Мамадалимов, Р.А. Муминов, Т.А. Усманов, Ш.А. Шоюсупов

Национальный университет Узбекистана им. М. Улугбека,
700174 Ташкент, Узбекистан

(Получена 12 марта 2002 г. Принята к печати 28 марта 2002 г.)

Фотоемкостным методом определены уровни ванадия в *n*- и *p*-Si. Показано, что в *n*-Si ванадий создает уровни только в верхней части запрещенной зоны с энергиями ионизации порядка $E_c - 0.21$, $E_c - 0.52$ эВ, в то время как в *p*-Si — как в верхней, так и в нижней частях запрещенной зоны: $E_c - 0.26$, $E_v + 0.31$, $E_v + 0.42$, $E_v + 0.52$ эВ. Установлено, что для всех уровней ванадия сечения фотоионизации для электронов больше, чем для дырок. Показано, что концентрация электрически активных центров ванадия в *n*-Si и *p*-Si зависит как от концентрации примесей с мелкими уровнями, так и от времени диффузии ванадия в Si.

Уровни ванадия кремния исследованы сравнительно слабо [1–4]. Энергии ионизации уровней по данным различных авторов приведены на рис. 1, *a*. Далее приведены результаты исследований свойств кремния, легированного ванадием фотоемкостным методом.

Легирование кремния марок КЭФ и КДБ с удельным сопротивлением $\rho = 5–100$ Ом · см производилось диффузионным методом из напыленного слоя ванадия на поверхность кремния при $T = 1200–1250^\circ\text{C}$ в течение 2–20 ч с последующим охлаждением в воздухе (~ 10 град/с). Коэффициент диффузии *V* меняется в интервале $3.4 \cdot 10^{-11}–4.4 \cdot 10^{-10}$ см²/с при изменении температуры от 1100 до 1250°C [5]. Удельное сопротивление *n*- и *p*-Si после диффузии ванадия незначительно возрастало. Это показывает, что при введении ванадия в кремний образуются как акцепторные, так и донорные уровни.

В качестве выпрямляющих контактов для образцов из *n*-Si(V) были использованы барьеры Шоттки, полученные после диффузии ванадия. Барьеры Шоттки были получены путем напыления золота в вакууме на поверхности *n*-Si. В образцах из *p*-Si предварительно изготавливались *p*–*n*-переходы путем диффузии фосфора при температуре 1250°C в течение 30 мин. При этом глубина залегания *p*–*n*-переходов не превышала

3–4 мкм. Параметры и концентрации уровней определялись из измерений фотоемкости (ФЕ) [6,7].

Концентрация электрически активных центров ванадия зависит от типа проводимости исходного кремния. Мы наблюдали, что в *p*-Si с ростом концентрации бора концентрация центров ванадия уменьшается, а в *n*-Si с увеличением концентрации фосфора концентрация центров *V* растет.

На рис. 2 приведены спектры ФЕ диодов из *n*-Si(V). Измеренные значения приращения емкости ΔC были пересчитаны в концентрацию заряженных центров ванадия *N* стандартным методом. Видно, что ванадий образует в верхней половине запрещенной зоны три уровня с энергиями ионизации $E_c - 0.21$, $E_c - 0.32$, $E_c - 0.52$ эВ (рис. 1, *b*). С увеличением времени диффузии общая концентрация ванадия возрастает. Индуцированная ФЕ [7] во всех измеренных диодах из *n*-Si(V) не наблюдалась, т. е. в нижней половине запрещенной зоны уровни либо отсутствуют, либо сечение захвата дырок на них менее 10^{-19} см².

Измерение кинетики нарастания ФЕ при освещении из области примесного поглощения позволило определить спектральную зависимость сечений фотоионизации χ для уровней ванадия. Согласно теории Луковского [8],

$$\chi \propto (h\nu - \Delta E_{\text{opt}})^{3/2} / (h\nu)^3$$

<i>a</i>			<i>b</i>	
<i>c</i> -band			<i>n</i> -Si	<i>p</i> -Si
..... $E_c - 0.22$	..... $E_c - 0.18$ A	..... $E_c - 0.22$	..... $E_c - 0.21$	..... $E_c - 0.26$
..... $E_c - 0.4$	..... $E_c - 0.43$ D	..... $E_c - 0.45$	..... $E_c - 0.32$	
		..... $E_c - 0.52$	..... $E_c - 0.52$	..... $E_v + 0.52$
..... $E_v + 0.42$		..... $E_v + 0.41$		..... $E_v + 0.42$
..... $E_v + 0.31$	..... $E_v + 0.31$ D			..... $E_v + 0.31$
<i>v</i> -band				
[1]	[2, 3]	[4]		

Рис. 1. Энергии ионизации уровней ванадия в кремнии: *a* — данные из работ [1–4]; *b* — результаты данной работы.

и, следовательно,

$$\chi^{2/3}(hv)^2 \propto hv - \Delta E_{\text{opt}}.$$

Экстраполяция функции $\chi^{2/3}(hv)^2 = f(hv)$ к нулю позволяет определить энергию ионизации глубокого уровня ΔE_{opt} . На рис. 3 показаны такие зависимости для χ_n и $\chi_n + \chi_p$, измеренные в n -Si; χ_n и χ_p — сечения захвата фотонов примесным центром при испускании электрона и дырки соответственно. Из рисунка вид-

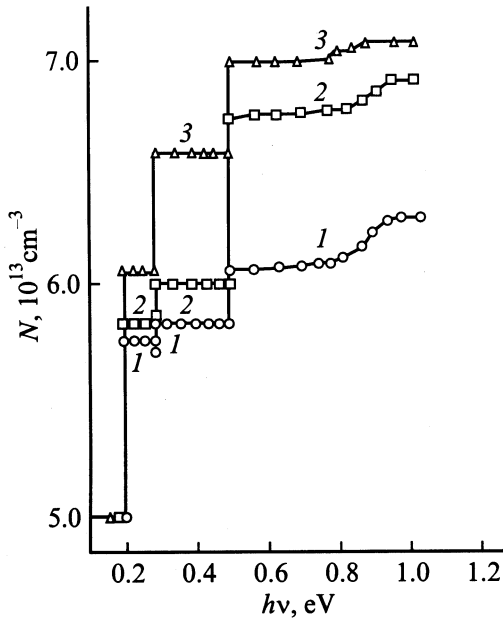


Рис. 2. Спектры фотоемкости диодов из n -Si(V) при временах диффузии, ч: 1 — 2, 2 — 10, 3 — 20. $T = 77$ К.

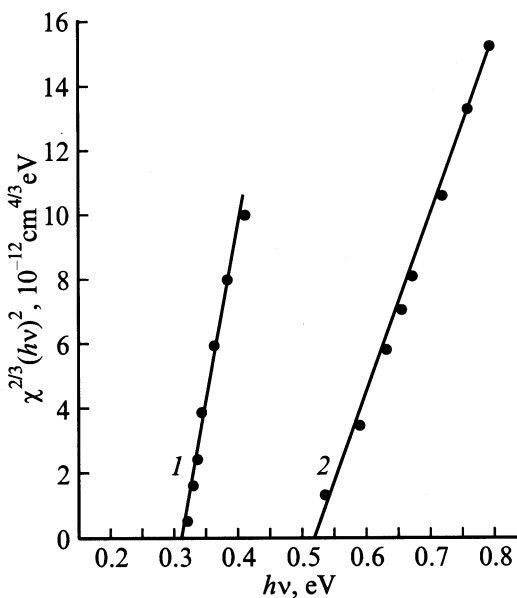


Рис. 3. Зависимости $\chi^{2/3}(hv)^2 = f(hv)$ для уровней ванадия в n -Si с энергией ионизации $E_c - 0.32$ эВ и $E_c - 0.52$ эВ (1 и 2 соответственно).

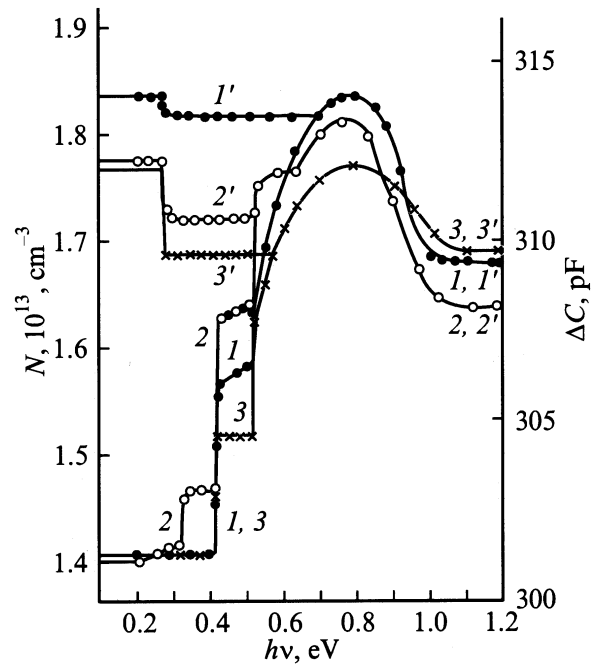


Рис. 4. Спектры фотоемкости (1, 2, 3) и индуцированной фотоемкости (1', 2', 3') диодов из p -Si(V) при временах диффузии, ч: 1, 1' — 2; 2, 2' — 10; 3, 3' — 20. $T = 77$ К.

но, что экспериментальные зависимости $\chi(hv)$ хорошо согласуются с теорией [8]. Экстраполяция дает значения χ для переходов $E_c - 0.32$ эВ и $E_c - 0.52$ эВ в зону проводимости для уровня $E_c - 0.32$ эВ в области $0.32 < hv < 0.45$ эВ $\chi_n = 10^{-17} - 10^{-16}$ см², для уровня $E_c - 0.52$ эВ с учетом двойных оптических переходов $\chi_n + \chi_p = 10^{-17} - 1.02 \cdot 10^{-16}$ см². Возрастающая зависимость $N(hv)$ в диодах из n -Si(V) обусловлена тем, что для уровней ванадия характерно соотношение $\chi_n \gg \chi_p$.

Измерения спектров ФЭ показали, что ванадий в нижней половине запрещенной зоны p -Si создает уровни с энергией ионизации $E_v + 0.31$ эВ, $E_v + 0.42$ эВ и $E_v + 0.52$ эВ, причем уровень $E_v + 0.31$ эВ образуется при диффузии в течение 10 ч (рис. 4). При более длительной диффузии (20 ч) данный уровень в спектре ФЭ отсутствует и одновременно повышается концентрация уровней $E_v + 0.42$ эВ и $E_v + 0.52$ эВ. Анализ спектров ФЭ p -Si(V) показывает, что для уровня $E_v + 0.52$ эВ также характерно соотношение $\chi_n > \chi_p$. Это следует из наблюдения спадающих участков в зависимости $\Delta C(hv)$ в спектрах ФЭ [7,9]. Уровни в верхней половине запрещенной зоны, которые обнаруживаются при измерении индуцированной ФЭ в p -Si(V), имеют энергию ионизации, равную $E_c - 0.26$ эВ.

В целом из результатов исследования спектров ФЭ и индуцированной ФЭ в диодах из n - и p -Si(V) можно сделать заключение, что действительно для всех уровней ванадия характерно соотношение $\chi_n > \chi_p$.

Список литературы

- [1] J.-W. Chen, A.G. Milnes. *Ann. Rev. Mater. Sci.*, **10**, 157 (1980).
- [2] H. Lemke. *Phys. St. Sol. (a)*, **64** (2), 549 (1981).
- [3] H. Lemke. *Phys. St. Sol. (a)*, **75** (1), 473 (1983).
- [4] Х.С. Далиев, А.А. Лебедев, Н.А. Султанов, В. Экке. *ФТП*, **19** (2), 338 (1985).
- [5] Г.К. Азимов, С.З. Зайнабидинов, Ю.И. Козлов. *ФТП*, **23** (10), 1890 (1989).
- [6] А.Т. Мамадалимов, А.А. Лебедев, Е.В. Астрова. *Спектроскопия глубоких центров в полупроводниках* (Ташкент, Университет, 1999).
- [7] Л.С. Берман, А.А. Лебедев. *Ёмкостная спектроскопия глубоких центров* (М., Наука, 1981).
- [8] G.V. Lucovsky. *Sol. St. Commun.* **3**, 299 (1965).
- [9] А.Т. Мамадалимов, С.С. Кахаров, Ш. Махкамов, П.К. Хабибуллаев. *Известия АН УзССР. Сер. физ.-мат. наук*, № 4, 53 (1980).

Редактор Т.А. Полянская

An investigation of photocapacitance of diodes fabricated from Si doped with vanadium

*H.T. Igamberdiev, A.T. Mamadalimov, R.A. Muminov,
T.A. Usmanov, Sh.A. Shoyusupov*

The Mirzo Ulugbek University of Uzbekistan,
700174 Tashkent, Uzbekistan

Abstract The parameters of vanadium levels in *n*- and *p*-Si have been found by a photocapacitance method. It is found that the injection vanadium into *n*-Si created the levels only on the upper part of forbidden zone with the ionization energies above $E_c - 0.21$, $E_c - 0.52$ eV while in *p*-Si on both the upper and the lower parts of the forbidden zone: $E_c - 0.26$, $E_v + 0.31$, $E_v + 0.42$, $E_v + 0.52$ eV. It is revealed that for all vanadium levels the section of the photoionization of electrons was larger than that of holes. It is shown that the electrically active vanadium center concentration in *n*- and *p*-Si depends on impurities with shallow levels, as well as on the diffusion time.