

УДК 621.315.592

Изучение влияния внешних воздействий на поведение примеси золота в кремнии

© С.З. Зайнабидинов, О.О. Маматкаримов, И.Г. Турсунов, У.А. Туйчиев

Ташкентский государственный университет им. М. Улугбека,
700095 Ташкент, Узбекистан

(Получена 2 мая 1999 г. Принята к печати 29 ноября 1999 г.)

Исследованы свойства атомов золота в кремнии и изменение их уровней под всесторонним гидростатическим давлением. Проведенные исследования показывают, что под воздействием давления (P) и температуры (T) ширина запрещенной зоны кремния изменяется со скоростью

$$\partial E/\partial P = -1.5 \cdot 10^{-11} \text{ эВ/Па} \quad \text{и} \quad \partial E/\partial T = -3.2 \cdot 10^{-6} \text{ эВ/К.}$$

Изменение положения глубоких уровней при деформации, сильно влияющее на электрофизические свойства полупроводников и зависящее от степени деформации внутренних связей в решетке и типа симметрии дефектов, может дать важную информацию о глубоких центрах в полупроводниковых кристаллах.

Известно, что авторами [1,2] была предложена модель глубокого центра Au в Si, которая связывает положение атома Au в решетке с зарядовым состоянием центра. Особенностью модели является возможность изменения положения зарядового состояния центра путем туннельного перехода.

В данной работе рассматриваются свойства атома золота в кремнии и изменение его уровней при гидростатическом давлении.

Для исследования готовились образцы размерами $3 \times 3 \times 7 \text{ мм}^3$. Легирование монокристаллов Si золотом проводилось из слоя диффузанта, нанесенного на поверхность кремния путем вакуумного напыления на установке УВН-2М-2. Диффузия проводилась в печах типа СОУЛ-4М в интервале температур $950\text{--}1200^\circ\text{C}$. После диффузионного отжига образцы закаливались сбрасыванием ампул в воду, скорость охлаждения составляла $V = 200 \text{ град/с}$.

Во всех экспериментах для изучения влияния дефектов термообработки на параметры кремния использовались контрольные образцы, обработанные в идентичных условиях, только без легирования. На все полученные образцы наносились омические контакты согласно [3], а их электропроводность определялась с помощью эффекта Холла.

Электрические параметры исследованных нами образцов $n\text{-Si}\langle\text{Au}\rangle$ (концентрация электронов N , подвижность μ , удельное сопротивление ρ) приведены в табл. 1.

Свойства образцов $n\text{-Si}\langle\text{Au}\rangle$ исследовали с помощью установки гидростатического давления с пневмоусилителем [4] в диапазоне давления $P = (0\text{--}6) \cdot 10^8 \text{ Па}$ при температуре $T = 300 \text{ К}$.

На рис. 1 показано относительное изменение тока I_P/I_0 во времени t при различных давлениях в образ-

цах $n\text{-Si}\langle\text{Au}\rangle$ с различным удельным сопротивлением. Из рисунка видно, что с увеличением давления до $P = (0\text{--}6) \cdot 10^8 \text{ Па}$ ток увеличивается для всех образцов. После выдержки в течение 20 с ток постепенно уменьшается ($P = \text{const}$). Наблюдаемые пики (максимальные значения тока) зависят от степени компенсации образца: чем больше удельное сопротивление, тем выше пик. В объеме образцов $\text{Si}\langle\text{Au}\rangle$, по нашему предположению, происходит временное опустошение атомов золота, т. е. электроны под действием давления переходят в зону проводимости и начинают участвовать в токе. Однако этот процесс продолжается не более 20 с. Затем электроны возвращаются на атомы золота и начинается спад тока в начальное положение.

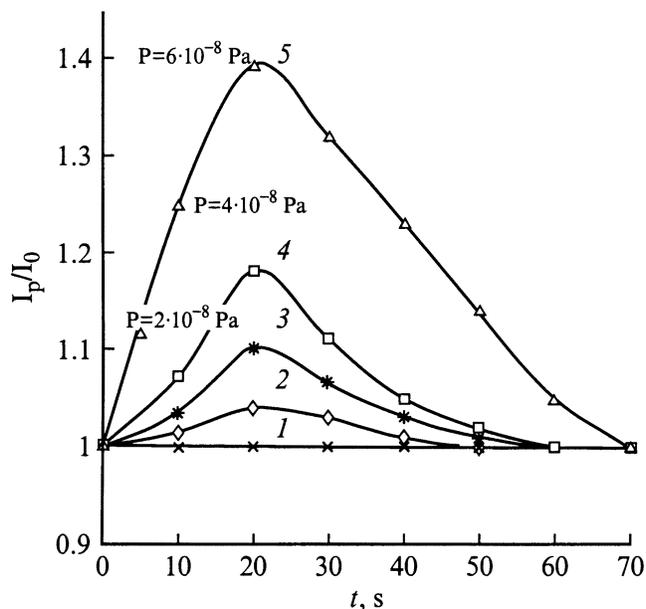


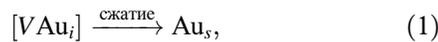
Рис. 1. Кинетические зависимости изменения тока при давлении в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Au}\rangle$. Образцы: 1 — $\text{Si}\langle\text{P}\rangle$, исходный; 2 — $\text{Si}\langle\text{P}\rangle$, контрольный; 3 — $\text{Si}\langle\text{Au}\rangle$, $\rho \approx 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$; 4 — $\text{Si}\langle\text{Au}\rangle$, $\rho \approx 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$; 5 — $\text{Si}\langle\text{Au}\rangle$, $\rho \approx 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Таблица 1. Параметры образцов

№	Образцы	Тип проводимости	Температура диффузии, °С	ρ , Ом·см	N_s , см ⁻³	μ_s , см ² /В·с
1	Si⟨P⟩	<i>n</i>	–	15	$3.47 \cdot 10^{14}$	1200
2	Si⟨Au⟩	<i>n</i>	920	$1.3 \cdot 10^2$	$3.94 \cdot 10^{13}$	1219
3	Si⟨Au⟩	<i>p</i>	960	$2 \cdot 10^2$	$3.13 \cdot 10^{14}$	500
4	Si⟨Au⟩	<i>n</i>	940	$2.9 \cdot 10^5$	$1.78 \cdot 10^{10}$	1214
5	Si⟨P⟩	<i>n</i>	–	7	$7.4 \cdot 10^{14}$	1200
6	Si⟨Au⟩	<i>n</i>	1050	$2.2 \cdot 10^3$	$2.7 \cdot 10^{12}$	1073
7	Si⟨Au⟩	<i>n</i>	1100	$1.9 \cdot 10^5$	$2.7 \cdot 10^{10}$	1220
8	Si⟨Au⟩	<i>p</i>	1200	$1.0 \cdot 10^5$	$1.8 \cdot 10^{11}$	343
9	Si⟨Ni⟩	<i>n</i>	1230	$1.0 \cdot 10^3$	$5.81 \cdot 10^{11}$	1080
		<i>p</i>	1250	$3.6 \cdot 10^4$	$4.67 \cdot 10^{11}$	249
10	Si⟨Gd⟩	<i>n</i>	1260	20.4	$2.12 \cdot 10^{14}$	1400

Согласно работам [1,2] трем возможным зарядовым состояниям примеси Au_i соответствуют три различные конфигурационные кривые, причем минимумы этих кривых не совпадают. Важно, что кривой с минимальной энергией соответствует центр [VAu_i], комплекс атома Au, смещенного в междоузлие, и образовавшейся вакансии. В случае сжатия атому золота выгодно сместиться назад: из междоузельной конфигурации в узел, так как именно эта конфигурация в сжатом материале соответствует минимуму энергии всей системы, причем этой конфигурации соответствует свое (другое) электронное состояние.

Отметим, что при этом каждый атом золота смещается согласно квазихимической реакции:



т.е. перемещается из междоузлия в узел. Здесь Au_s соответствует положению атома золота в узле. После снятия сжатия система оказывается метастабильной и начинает спонтанно переходить в положение [VAu_i]:



Важно, что этот переход осуществляется туннельным способом, как это показано в работе [1].

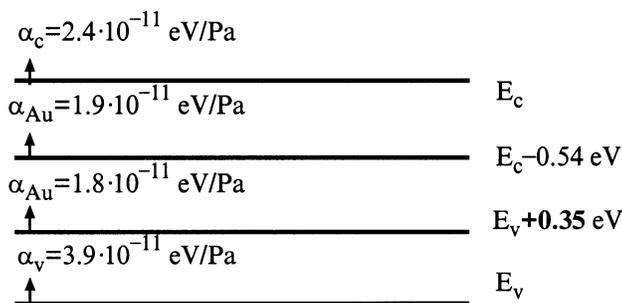


Рис. 2. Энергетическая диаграмма уровней Au в Si под давлением.

Характерное время релаксации вычисляется как

$$\tau_r = \tau_0 [F_{FK}]^{-1}, \quad (3)$$

где τ_0 — величина с размерностью времени (куда входит электронный матричный элемент), F_{FK} — фактор Франк–Кондона (куда входит перекрытие волновых функций атома золота в двух состояниях: Au_s и Au_i).

Таблица 2. Параметры уровней

Образцы	E_i	ΔE_i , эВ	α , 10^{-11} эВ/Па	P , 10^8 Па	Литература
Si⟨Au⟩*	$E_c - 0.54 \text{ эВ}$	0.53	1.81	6	–
Si⟨Au⟩**	$E_v + 0.36 \text{ эВ}$	0.34	1.97	6	–
Si⟨Ni⟩	$E_c - 0.42 \text{ эВ}$	0.41	1.12	6	[6]
Si⟨Ni⟩	$E_v + 0.21 \text{ эВ}$	0.20	1.33	6	–
Si⟨Gd⟩	$E_v + 0.34 \text{ эВ}$	0.33	0.8	6	[7]

Примечание. E_i — энергии уровней; ΔE_i — изменение энергии уровней под давлением; * — образец 2 в табл. 1; ** — образец 8 в табл. 1.

Согласно экспериментальным результатам, коэффициент давления можно определить с помощью выражения [5]

$$\alpha = (kT/\Delta P) \ln(N_p/N_0). \quad (4)$$

Обработка экспериментальных данных дала значения коэффициента давления для образцов с золотом и другими примесями, которые приведены в табл. 2.

Используя данные из табл. 2, можно составить энергетическую диаграмму для образцов Si⟨Au⟩, которая приведена на рис. 2.

Под воздействием давления и температуры ширина запрещенной зоны кремния изменяется со скоростью $\partial E/\partial P = -1.5 \cdot 10^{-11} \text{ эВ/Па}$ и $\partial E/\partial T = -3.2 \cdot 10^{-6} \text{ эВ/К}$.

В заключение хотелось бы отметить, что подобный эффект, по-видимому, может наблюдаться только в случае, когда введенная примесь достаточно метастабильна. С этой точки зрения понятно, почему такой эффект

не наблюдается в кремнии, легированном никелем и гадолинием [7]. В то же время, поскольку, как показано в [8], марганец, введенный в кремний, является метастабильной примесью, которая может менять свое положение в решетке (узел–междоузлие) под влиянием внешних воздействий, в Si(Mn) следует ожидать подобного эффекта.

Авторы выражают благодарность А.Ю. Лейдерман за обсуждение работы и ценные замечания.

Список литературы

- [1] Н.Т. Баграев, В.А. Машков. Письма ЖЭТФ, **39**(5), 211 (1984).
- [2] N.T. Bagraev, V.A. Mashkov. Sol. St. Commun., **51**(7), 515 (1984).
- [3] Л.П. Павлов. *Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов* (М., Высш. шк., 1975) с. 206.
- [4] А. Абдураимов, С.З. Зайнабидинов, О.О. Маматкаримов, О. Химматкулов, Т. Худойбергенов. ПТЭ, № 5, 229 (1992).
- [5] А.Л. Полякова. *Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов* (М., 1979) с. 169.
- [6] А. Абдураимов, С.З. Зайнабидинов, О.О. Маматкаримов, И.Г. Турсунов, О. Химматкулов. ФТП, **27**(3), 516 (1993).
- [7] О.О. Маматкаримов. Автореф. канд. дис. (Ташкент, 1993).
- [8] Н.Т. Баграев, Р.М. Марсаатов, И.С. Половец, А. Юсупов. ФТП, **34**(3), 870 (1992).

Редактор Л.В. Шаронова

A study of external impacts on the behaviour of gold as an impurity in silicon

S.Z. Zainabidinov, O.O. Mamatkarimov, I.G. Tursunov,
U.A. Tuichiev

M. Ulugbeck Tashkent State University,
700095 Tashkent, Uzbekistan