

06; 12

© 1991

О ВЛИЯНИИ НОВОГО ЦЕНТРА ЗОЛОТА  
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВШ. Махкамов, Н.А. Турсунов,  
М. Маманова, М. Ашуров

Известно, что кремний, легированный золотом, используется для изготовления различных полупроводниковых приборов [1-4].

Легирование кремния золотом обеспечивает повышение быстродействия полупроводниковых приборов [1], расширяет и повышает спектральную область чувствительности фотоприемников [2, 3], изменяет прямое падение напряжения, обратные токи и ряд других характеристик изготавливаемых приборов [4].

Все перечисленные выше изменения свойств и характеристик кремния и приборов на базе легированного материала основаны на введении двух известных глубоких центров золота с  $E_C - 0.54$  и  $E_V + 0.35$  эВ.

Целью настоящей работы является исследование параметров нового центра золота и влияние его на характеристики диодов, изготовленных из  $Si \langle Au \rangle$ .

Исследуемые образцы кремния марки БКЭФ3-18, легированные золотом в процессе выращивания, имели проводимость  $n$ -типа и удельное сопротивление 16-20 Ом·см. Общая концентрация электрически активного золота в образцах составляла  $8 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Параметры центров  $Au$  изучались методом емкостной спектроскопии и стационарной фотопроводимости. Для изменения концентрации центров золота проводилась высокотемпературная обработка (ВТО) в интервале 700-1200 °С. Время выдержки при каждой температуре составляло 1 ч, после чего образцы охлаждались до комнатной температуры в течение 0.5 ч во избежание образования закалочных дефектов [5].

Измерения спектра  $DITS$  диодов, изготовленных после ВТО, показало наличие двух пиков, соответствующих известному акцепторному уровню золота  $E_1 = E_C - 0.54$  эВ и новому акцепторному состоянию  $Au$  с уровнем  $E_2 = E_C - 0.58$  эВ, четко разрешаемого после ВТО.

На рис. 1 представлена кинетика изменения концентрации уровней  $Au$   $E_1$  (кривая 1) и  $E_2$  (кривая 2) при ВТО.

Как видно из рисунка, в области 700-900 °С изменения концентрации уровней  $E_1$  и  $E_2$  имеют близкий характер. Дальнейшее повышение температуры до 1000 °С приводит к резкому изменению концентрации обоих центров. Для уровня  $E_1$  при режимах ВТО 1200 °С наблюдается повышение концентрации примерно в 2.5-

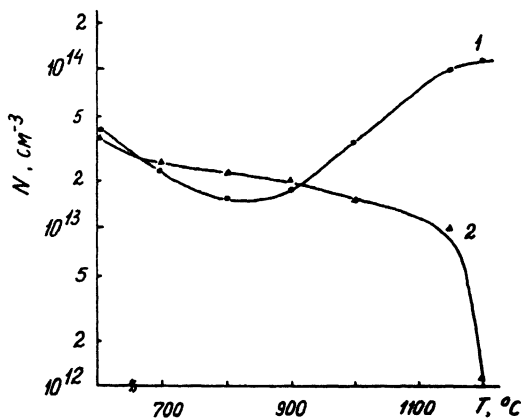


Рис. 1. Зависимость изменения концентрации глубоких уровней золота в кремнии от температуры ВТО. 1 -  $E_C - 0.54$  эВ, 2 -  $E_C - 0.58$  эВ.

3.0 раза по сравнению с первоначальной. Концентрация уровня  $E_2$  монотонно убывает и при температурах 1200 °C спадает до  $\leq 10^{12}$  см<sup>3</sup>.

Сильная зависимость концентрации уровня  $E_2$  от степени легирования кремния золотом при выращивании и взаимосвязанность уровня  $E_2$  и  $E_1$  показывают, что центр с уровнем  $E_2$  обусловлен примесью Au.

Различие характера кинетики отжига и формирования дополнительного центра золота при ВТО позволяет регулировать характеристики диодов и изменять в широком пределе соотношение электрически активных состояний уровней  $E_1$  и  $E_2$ . Для выяснения влияния положений энергетических уровней и соотношения их концентраций на характеристики изготовленных диодов нами исследовались изменения прямого падения напряжения ( $U_{пр}$ ), обратного тока ( $J_{обр}$ ), обратного напряжения ( $U_{обр}$ ) и времени восстановления обратного сопротивления ( $\tau_{восст}$ ) после ВТО при различных режимах.

Из перечисленных характеристик наиболее чувствительными к изменению положения энергетических уровней и концентрации центров оказались значения  $J_{обр}$  и  $\tau_{восст}$ . Изменение значения  $\tau_{восст}$  при ВТО в диодах из кремния, легированного золотом при выращивании, нами исследовано в работе [6], где было показано, что при определенных режимах ВТО можно повысить быстродействие диодов в 3-5 раз по сравнению с диодами, изготовленными из не термообработанного Si(Au). Известно, что возрастание быстродействия диодов, обусловленное повышением концентрации электрически активного рекомбинационного центра Au, сопровождается

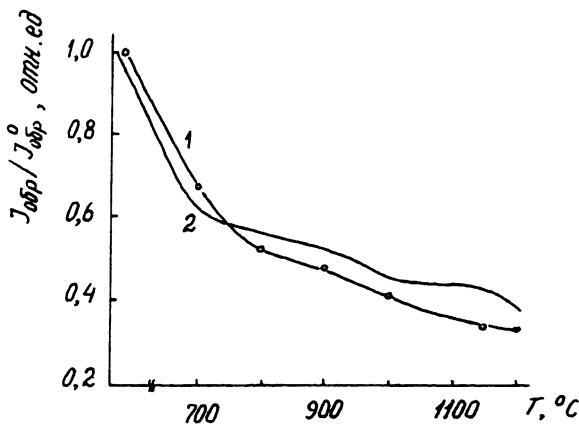


Рис. 2. Относительное изменение обратного тока диодов из  $Si_{1-x}Au_x$  от температуры ВТО. 1 - эксперимент, 2 - расчет.

ухудшением значения  $J_{обр}$  [7]. Однако при ВТО кремния, легированного золотом при выращивании, наблюдается обратная картина (рис. 2, кривая 1). Как видно из рисунка, возрастание температуры ВТО приводит к уменьшению в 2-3 раза значения  $J_{обр}$ , причем повышенное в несколько раз быстродействие диода при этом сохраняется [6]. Такая аномалия в изменении значения  $J_{обр}$  связана с формированием при ВТО нового акцепторного состояния золота  $E_2$  (рис. 1) и существенным влиянием изменения соотношения концентраций уровней  $E_1$  и  $E_2$ .

Для подтверждения полученных результатов проводился расчет полного обратного тока диода с учетом того, что диффузионная составляющая обратного тока мала по сравнению с током генерации. В этом случае обратный ток выражается [7]

$$J_{обр} \approx q n_i W \tau_{эфф}^{-1}, \quad (1)$$

где  $q$  - заряд электрона,  $n_i$  - концентрация носителей заряда в собственном кремнии,  $W$  - ширина обедненного слоя,  $\tau_{эфф}$  - эффективное время, которое равно

$$\tau_{эфф} = \frac{\bar{\sigma}_n \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) + \bar{\sigma}_p \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right)}{\bar{\sigma}_p \bar{\sigma}_n v_t N_t}. \quad (2)$$

Здесь  $\bar{\sigma}_n$  и  $\bar{\sigma}_p$  - сечение захвата электрона и дырки соответственно;  $v_t$  - тепловая скорость носителей заряда;  $N_t$  и  $E_t$  - концентрация и энергетический уровень центров золота. В случае двухуров-

новой модели, что имеет место в данной работе,  $\tau_{эфф}$  определяется из выражения

$$\tau_{эфф}^{-1} = \tau_{эфф}^{-1}(E_1) + \tau_{эфф}^{-1}(E_2). \quad (3)$$

Вычисленные значения  $\sigma_n$  для уровней  $E_1$  и  $E_2$  из емкостных измерений равны  $2 \cdot 10^{-15}$  и  $3.8 \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup> соответственно. Значение  $\sigma_p(E_1)$  для уровня  $E_1$  определялось фотоемкостным методом и равно  $1.2 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup>, а  $\sigma_p(E_2)$  для уровня  $E_2$  определялось из выражения

$$\tau_p^{-1} = \sigma_p(E_1) \nu_t N(E_1) + \sigma_p(E_2) \nu_t N(E_2). \quad (4)$$

При этом получено значение, равное  $3.1 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup>.

Подставляя (2) в (1) с учетом (3) и (4) и используя экспериментально измеренные значения  $\sigma_n$ ,  $\sigma_p$ ,  $E_t$  и  $N_t$  проводился расчет обратного тока. Относительное изменение  $J_{обп}$  от температуры ВТО приведено на рис. 2 (кривая 2). Как видно из рисунка, экспериментально измеренные значения обратного тока хорошо согласуются с расчетными данными.

Сопоставление концентрации уровней золота и величин обратных токов до и после ВТО показывает, что до температур обработки 1150 °С величина  $J_{обп}$  определяется током генерации, обусловленным обоими уровнями золота  $E_c - 0.54$  и  $E_c - 0.58$  эВ. При температуре обработки 1200 °С, когда концентрация уровня  $E_c - 0.58$  эВ становится  $\leq 10^{12}$  см<sup>-3</sup>, а концентрация уровня  $E_c - 0.54$  эВ возрастает и становится сопоставимой с суммарной концентрацией обоих уровней золота нетермообработанного Si(Au), величина обратного тока диода уменьшается в 2–3 раза.

Сильное влияние уровня  $E_2$ , расположенного практически в середине запрещенной зоны Si, на значение  $J_{обп}$  диодов показывает, что сформировавшийся уровень является более эффективным рекомбинационным центром по сравнению с уровнем  $E_1$ . Такое свойство центра с  $E_c - 0.58$  эВ хорошо согласуется с моделью Саха-Нойса-Шокли [8].

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать заключение – путем ВТО кремния, легированного золотом при выращивании, можно существенно изменить соотношение концентрации уровней золота, расположенных в середине запрещенной зоны кремния и улучшить обратные токи диодов, изготовленных на его основе, что очень важно при изготовлении быстродействующих диодов с высокими обратными напряжениями и малыми обратными токами.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Н о с о в Ю.Р. Полупроводниковые импульсные диоды. М.: Сов. радио, 1965. 224 с.

- [2] Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М.: Мир, 1977. 564 с.
- [3] Ing S.W., Gerhard G.C. // Proc. IEEE. 1965. V. 53. P. 1714-1718.
- [4] Bakanovskii A.E., Forster J.H. // Bell. Syst. Techn. J. 1960. V. 39. N 1. P. 87-104.
- [5] Абдурахманов К.П., Лебедев А.А., Угамурадова Ш.Б., Далиев ХС., Ирханов Б.Г. // Изв. АН УзССР. Сер. физ.-мат. наук. 1989. № 6. С. 46-49.
- [6] Мирзаев А., Турсунов Н.А., Маманова М., Ашуров М. Тез. докл У1 Всесоюз. конф. по физико-химическим основам легирования полупроводниковых материалов. М.: Наука, 1988. С. 17.
- [7] Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1973. 656 с.
- [8] Sah C.T., Noyse R.N., Shockley W. // Proc. IEEE. 1957. V. 45. P. 1228-1236.

Институт ядерной  
физики  
АН Республики Узбекистан

Поступило в Редакцию  
9 ноября 1991 г.