

©1994 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННОЙ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СОСТОЯНИЕ ЦЕНТРОВ ЗОЛОТА В КРЕМНИИ

*Ш.Махкамов, Н.А.Турсунов, М.Ашуров, М.Маманова,
С.В.Мартынченко*

Институт ядерной физики Академии наук Узбекистана,
702132, Улугбек, Узбекистан

(Получена 29 апреля 1994 г. Принята к печати 6 июня 1994 г.)

Методами DLTS и стационарной фотопроводимости исследовано влияние радиационной и термической обработки на процесс электроактивации центров золота в кремнии. Показано, что термообработка при 650°C облученных образцов приводит к существенному повышению концентрации электрически активных центров золота по сравнению с необлученными образцами. Установлено наличие пропорциональной зависимости концентрации электрически активных центров золота от потока облучения. Обнаружено уменьшение температуры отжига узельного состояния золота, смещение температуры отжига при котором происходит электроактивация сформированных центров в область более низких температур и существенное различие их концентрации до и после термообработки. Обсуждается возможный механизм процесса электроактивации центров золота при радиационной и термической обработках, основанный на взаимодействии атомов золота с компонентами радиационных дефектов.

Исследованию поведения золота в кремнии в зависимости от исходных электрофизических параметров материала, режимов легирования и термической обработки кремния посвящено достаточно большое количество работ, которые обобщены в [1,2]. В указанных работах изменение свойств и характеристик кремния достигается путем регулирования концентрации электрически активных центров золота только термическим способом. Позднее в работах [3-6] была показана возможность повышения концентрации электрически активных центров золота в легированном кремнии лазерной обработкой и частичного их уменьшения при радиационной или плазменной обработке.

Более существенное изменение концентрации центров золота в кремнии было обнаружено нами при терморadiационной обработке [7,8]. Однако изменение эффективной концентрации электрически активных центров золота в зависимости от дозы облучения и их перестройка при варьировании режимов термической обработки для кремния с различным типом проводимости и степенью легирования золотом

остаются не ясными. Далее приводятся данные именно о влиянии указанных факторов на состояние центров золота в легированном кремнии и рассматривается механизм взаимодействия атомов золота с радиационными дефектами.

В экспериментах использовались монокристаллы кремния n - и p -типов проводимости с удельным сопротивлением (2–20) Ом·см. Легирование золотом осуществлялось термодиффузионным методом в интервале температур (850–1100)°С, что позволяло изменять степень легирования кремния. Для определения параметров уровней Au в Si изготавливались диоды из Si(Au). Контроль параметров центров золота проводился измерением спектра DLTS в интервале температур (80–400)К в режиме постоянного напряжения при $t_1 = 50$ мкс и $t_2 = 250$ мкс, а рекомбинационные свойства центров изучались путем измерения времени жизни неосновных носителей заряда (τ_n или τ_p) методом стационарной фотопроводимости и по переходным характеристикам диодов. Облучение проводилось потоком гамма-квантов ^{60}Co до значений $3 \cdot 10^{19}$ см $^{-2}$, а последующий изохронный отжиг осуществлялся в интервале (200–800)°С с шагом 50°С в течение 0.5 ч. Для определения роли радиационных дефектов в процессе перестройки центров золота одновременно с облученными образцами изохронному отжигу при идентичных условиях подвергались и необлученные образцы Si(Au).

На рис. 1 представлено изменение времени жизни неосновных носителей заряда в зависимости от температуры изохронного отжига облученных и необлученных образцов Si(Au). Как видно из рисунка, на значения τ_n , τ_p при отжиге существенно влияют исходный тип проводимости кремния и предварительная радиационная обработка. Для необлученных образцов резкое изменение $\tau_{n,p}$ происходит при температурах отжига 500 и 650°С соответственно для p -Si(Au) (кривая 1) и n -Si(Au) (кривая 2). Наблюдаемое повышение значения $\tau_{n,p}$ в указанных областях температур хорошо согласуется с данными [9–10] и объясняется уменьшением концентрации рекомбинационных центров золота вследствие термического распада твердого раствора Si–Au. Различия в температурах отжига рекомбинационных центров золота в n - и p -Si указывают на то, что донорные и акцепторные центры имеют неодинаковую энергию активации распада и соответствуют различным состояниям атомов Au в Si. В области температур отжига (750–800)°С и выше преобладает обратный процесс — электроактивация рекомбинационных центров Au [12], которая сопровождается понижением $\tau_{n,p}$ как в n -Si, так и в p -Si.

Изохронный отжиг облученных образцов кремния, легированного золотом, показал, что облучение γ -квантами потоком 10^{18} см $^{-2}$ и выше приводит к уменьшению значения $\tau_{n,p}$ и смещению температуры отжига рекомбинационных центров золота в область низких температур. Из рис. 1 видно, что в таких образцах наблюдается три температурных участка изменения значения $\tau_{n,p}$. В области температур (350–450)°С, изменение $\tau_{n,p}$ в основном связано с отжигом радиационных рекомбинационных центров, введенных при γ -облучении [13,14]. В области температур (450–550)°С происходит незначительное уменьшение концентрации центров золота, сопровождающееся резким ростом

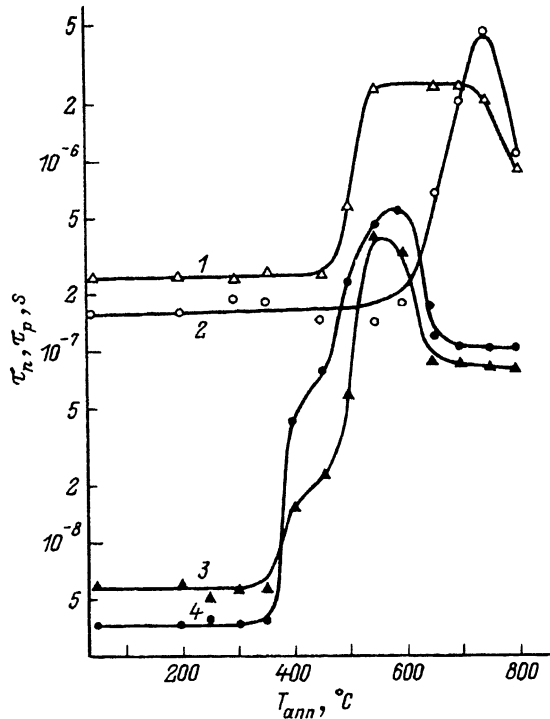


Рис. 1. Изменение времени жизни неосновных носителей заряда τ_n и τ_p в кремнии, легированном золотом, при изохронном отжиге при температуре T_{ann} . Образцы: 1, 3 — p -Si(Au), 2, 4 — n -Si(Au); 1, 2 — необлученные, 3, 4 — облученные γ -квантами ^{60}Co , поток $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$.

значения $\tau_{n,p}$. При этом облучение практически не влияет на температуру отжига донорных центров золота с энергией $E_D + 0.35 \text{ эВ}$, в то время как акцепторные центры с энергией $E_A - 0.54 \text{ эВ}$ начинают отжигаться при более низких температурах по сравнению с необлученными образцами. Дальнейшее повышение температуры отжига приводит к тому, что процесс электроактивации центров начинает преобладать над процессом распада. В облученных образцах электроактивация рекомбинационных центров золота происходит при относительно низких температурах ($600\text{--}650^\circ\text{C}$) и достигает насыщения при температуре отжига ($700\text{--}750^\circ\text{C}$) (рис. 1, кривые 3, 4), а в необлученных образцах Si(Au) электроактивация центров золота наблюдается при температурах 800°C и выше (рис. 1, кривые 1, 2) и не зависит от исходного типа проводимости.

Сопоставление значений $\tau_{n,p}$ облученных и необлученных образцов после отжига при идентичных температурах показывает, что в облученных образцах значение $\tau_{n,p}$ в 8–10 раз меньше по сравнению с необлученными. Такое изменение концентрации рекомбинационных центров указывает на наличие взаимосвязи между количеством электроактивируемых центров и введенными радиационными дефектами.

Подтверждением указанного предположения является существенное изменение концентрации электрически активных центров золота в зависимости от потока облучения при постоянной температуре отжига (рис. 2). Из рис. 2 видно, что заметное изменение концентрации электрически активных центров золота наблюдается после облучения потоком 10^{18} см^{-2} . Увеличение потока γ -квантов приводит к возрастанию концентрации электрически активных центров золота с постепен-

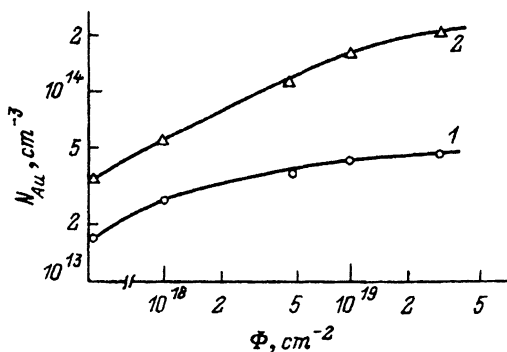


Рис. 2. Изменение концентрации центров золота в кремнии от потока γ -квантов после отжига при 700°C . Температура диффузии $T_D = 900^\circ\text{C}$. Энергия центров Au: 1 — $E_c - 0.54 \text{ эВ}$, 2 — $E_v + 0.35 \text{ эВ}$.

ным выходом на насыщение при потоках более $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$. Дальнейшее увеличение потока облучения практически не влияет на концентрацию электрически активных центров золота. Такая стабилизация электрически активного состояния центров золота связана с достижением максимального значения радиационных дефектов для данных параметров кремния [15]. На абсолютную величину концентрации электрически активных центров золота и эффективность ее изменения при терморadiационной обработке существенно влияет также степень легирования кремния золотом.

Для оценки вклада степени легирования кремния на процесс электроактивации золота проводилась диффузия Au в *n*- и *p*-Si в интервале температур (850–1050) $^\circ\text{C}$ и контролировалось изменение концентрации центров золота (рис. 3).

Анализ спектра DLTS в таких образцах показал, что концентрация электрически активных центров золота с энергиями $E_c - 0.54 \text{ эВ}$ и $E_v + 0.35 \text{ эВ}$ возрастает с повышением температуры диффузии. Облучение потоками $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ и последующий отжиг при 700°C приводят к дополнительному возрастанию концентрации центров $E_c - 0.54 \text{ эВ}$ и $E_v + 0.35 \text{ эВ}$ во всех образцах (рис. 3, кривые 1, 2). Изменение эффективной концентрации электрически активных центров золота при посто-

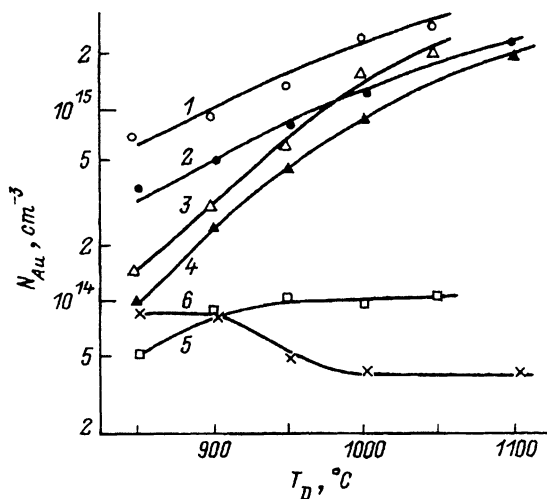


Рис. 3. Изменение концентрации центров золота от температуры диффузии T_D . Образцы: 1, 3, 5 — *n*-Si(Au), 2, 4, 6 — *p*-Si(Au); 1, 2 — после облучения и отжига, 3, 4 — необлученные, 5, 6 — после отжига.

янном потоке облучения определяется степенью легирования кремния золотом. Возрастание степени легирования Si приводит к уменьшению разницы в концентрации центров золота в терморрадиационно-обработанном и в необработанном таким образом Si(Au).

Сопоставление концентрации центров Au после отжига при 700°C в облученных и необлученных образцах показывает, что в необлученных образцах Si(Au) наблюдается только уменьшение концентрации электрически активных центров вследствие распада твердого раствора кремний-золото. Такое изменение дополнительно подтверждает тот факт, что вводимые при облучении радиационные дефектные центры, распадаясь, активно вступают в квазихимическую реакцию и существенно изменяют эффективность перестройки центров золота при термообработке.

Для объяснения полученных экспериментальных результатов рассмотрим наиболее вероятный механизм взаимодействия атомов золота с радиационными дефектами. Известно, что при радиационной обработке γ -квантами ^{60}Co образцов Si(Au) в основном образуются A-, E-центры и дивакансии с различными зарядовыми состояниями. Образование радиационных дефектов с участием атомов золота маловероятно, так как даже наличие золота в достаточных концентрациях практически не влияет на скорость введения и концентрацию формирующихся дефектов [16]. Как было показано выше, при дозах облучения $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ концентрация образующихся радиационных дефектов для исследованных образцов Si достигает насыщения. Наличие таких комплексов дефектов частично искажает решетку кремния и может приводить к появлению дополнительных деформационных полей (как это происходит в случае нейтронного облучения [4,17,18]), особенно вблизи узла решетки кремния, так как одним из основных компонентов сформированных радиационных дефектов является вакансия. Если учесть, что уровень золота $E_c - 0.54 \text{ эВ}$ является узельным, а уровень $E_v + 0.35 \text{ эВ}$ — межузельным центром [1,10,11,19], то можно ожидать, что образование радиационных дефектов приводит к некоторому изменению энергии связи узельного золота по сравнению с межузельным. Изменение энергии связи узельного центра золота в кристаллической решетке Si, связанное с появлением деформационных полей, может понизить температуру отжига (и перестройки) золота в кремнии. Проведенная термическая обработка облученного и необлученного Si(Au) подтверждает указанное выше предположение, т.е. в облученных образцах температура отжига узельного состояния золота уменьшается на (150–200)°C по сравнению с необлученными образцами (рис. 1), а температура отжига межузельного состояния золота практически не изменяется. Сохранение температуры отжига межузельного состояния золота показывает, что деформационные поля, обусловленные радиационными дефектами, не влияют на процесс распада центра с энергией $E_v + 0.35 \text{ эВ}$. Однако роль радиационных дефектов в процессе электроактивации центров золота — определяющая.

При температурах отжига 600°C и выше происходит распад термостабильных радиационных дефектов [20] и электрически не активных комплексов золота, что приводит к повышению скорости их миграции. Повышение скорости миграции увеличивает вероятность их взаимодействия с последующим образованием метастабильных электрически

активных состояний дефектов. Абсолютная концентрация их определяется степенью легирования кремния золотом и количеством введенных радиационных дефектов. Наблюдаемое различие в концентрациях электрически активных донорных и акцепторных центров Au после терморadiационной обработки можно объяснить большей вероятностью захвата атомов золота в межузельном состоянии по сравнению с узельным.

Таким образом, проведенные исследования и анализ полученных результатов позволяют сделать вывод о том, что радиационная обработка и последующий низкотемпературный отжиг $\text{Si}\langle\text{Au}\rangle$ дают возможность за счет стимуляции протекания квазихимической реакции атомов золота с радиационными дефектами повысить концентрацию электрически активных центров золота по сравнению с кремнием, легированным при высокой температуре, что очень важно для понижения температуры изготовления различных полупроводниковых приборов из легированного кремния.

Список литературы

- [1] Б.И. Болтакс, М.К. Бахадырханов, С.М. Городецкий, Г.С. Куликов. *Компенсированный кремний* (Л., 1972).
- [2] А. Милнс. *Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках* (М., 1977).
- [3] Д.А. Вахабов, А.С. Закиров, Х.Т. Игамбердыев, Х. Кузибаев, А.Т. Мамадалимов, Ш. Махкамов, П.К. Хабибуллаев. *ФТП*, **20**, 747 (1986).
- [4] Ю.А. Капустин, Б.М. Колокольников, В.В. Котов, А.В. Медведков. *ФТП*, **24**, 871 (1990).
- [5] И.В. Антонова, А.В. Васильев, В.И. Панов, С.С. Шаймеев. *ФТП*, **23**, 253 (1989).
- [6] С.В. Ковешников, Е.Б. Якимов, Н.А. Ярыкин. *Физика, химия, механика*, № 11, 85 (1987).
- [7] Ш. Махкамов, М. Маманова, А. Мирзаев, Н.А. Турсунов. *Препринт № Р-9-347* (Институт ядерной физики, 1988).
- [8] Ш. Махкамов, Н.А. Турсунов, М. Маманова, М. Ашуров. *ДАН Узбекистана* № 1, 20 (1993).
- [9] А.З. Бадалов, В.Б. Шуман. *ФТТ*, **12**, 2116 (1979).
- [10] Н.Т. Баграев, Л.С. Власенко, А.А. Лебедев. *ЖТФ*, **55**, 2149 (1985).
- [11] Ш. Махкамов, Н.А. Турсунов, А.Д. Блинков, М. Ашуров. *Изв. АН УзССР. Сер. физ.-мат. наук*, № 2, 47 (1985).
- [12] К.Д. Глинчук, Н.М. Литовченко. *ФТТ*, **6**, 3701 (1964).
- [13] Л.С. Берман, А.А. Лебедев. *Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках* (Л., 1981).
- [14] В.В. Емцев, Т.В. Машовец. *Примеси и точечные дефекты в полупроводниках* (М., 1981).
- [15] И.Д. Конозенко, А.К. Семенюк, В.И. Хиврич. *Радиационные эффекты в кремнии* (Киев, 1974).
- [16] Л.С. Берман, В.Б. Шуман. *ФТП*, **10**, 2389 (1976).
- [17] Р.Ф. Коноплева, В.Л. Литвинов, Н.А. Ухин. *Особенности радиационного повреждения полупроводников частицами высоких энергий* (М., 1971).
- [18] Ш. Махкамов, М. Маманова, Ю.В. Пахакуров, Н.А. Турсунов. *Письма ЖТФ*, **18**, 44 (1992).
- [19] N.T. Bagraev, V.A. Mashkov. *Sol. St. Commun.*, **51**, 515 (1984).
- [20] Ю.М. Добровинский, Ш. Махкамов, А. Мирзаев, В.И. Митин, Н.А. Турсунов. *ФТП*, **25**, 523 (1991).

Редактор Т.А. Полянская