

ПОВЕДЕНИЕ ЦЕНТРОВ ЗОЛОТА В КРЕМНИИ *n*-ТИПА ПОСЛЕ НЕЙТРОННОГО И γ -ОБЛУЧЕНИЯ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

Капустин Ю. А., Колокольников Б. М., Котов В. В., Медведков А. В.

Методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ) проведено исследование влияния нейтронного и γ -облучения и механической обработки поверхности на поведение центров золота в кремнии *n*-типа. Установлено, что нейтронное облучение дозой более 10^{14} см⁻² и механическая обработка поверхности приводят к значительному уменьшению концентрации электрически активных центров золота в *n*-кремнии, а γ -облучение дозой до 10^8 рад не изменяет их концентрации. На основании полученных результатов сделан вывод о том, что переход электрически активных центров золота в *n*-Si в электрически неактивное состояние обусловлен изменением их динамического поведения, связанного с воздействием полей упругих напряжений, возникающих в образцах после нейтронного облучения дозой $> 10^{14}$ см⁻² и механической обработки поверхности.

В [1] нами исследовано воздействие нейтронного и γ -облучения на время жизни неравновесных носителей заряда (τ) в *n*-Si, диффузионно-легированном золотом. Установлено, что γ -облучение до 10^8 рад не приводит к изменению τ . Напротив, нейтронное воздействие начиная с доз 10^{14} см⁻² приводит к заметному возрастанию τ . Известно также, что γ -излучение не приводит к изменению электрических свойств и ряда других примесей с глубокими уровнями (ГУ) в кремнии [2-4]. Данные о воздействии нейтронного облучения на примеси с ГУ в кремнии в литературе практически отсутствуют, хотя и представляют интерес как для физики центров с ГУ в полупроводниках, так и для радиационной физики и техники полупроводников.

В настоящей работе было исследовано влияние нейтронного и γ -облучения на поведение центров золота в *n*-Si методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ). В качестве исходных использовались кристаллы кремния, выращенные из кварцевого тигля и легированные фосфором ($n \approx 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³). Насыщение золотом проводилось путем диффузии из слоя Au, напыленного на поверхности кремния при температуре 1060 °C в атмосфере сухого азота. После окончания диффузии пластины закаливались на воздухе. Непрореагировавшее золото удалялось в «царской водке». В дальнейшем часть кристаллов подвергалась облучению реакторными нейтронами дозой 10^{13} — 10^{15} см⁻², часть — γ -облучению дозой 10^6 — 10^8 рад, часть образцов *n*-Si<Au> не облучалась. Облучению подвергались также контрольные образцы, т. е. не легированные золотом и прошедшие такую же термообработку, что и образцы, легированные золотом.

Перед измерениями НЕСГУ поверхностный слой (≈ 100 мкм) удалялся в полирующем травителе. Затем путем напыления алюминия производилось создание контактов Шоттки. Дополнительной термообработки при этом не производилось. Исследование спектров НЕСГУ проводилось при напряжении смещения 5 В и длительности импульса заполнения 100 мкс.

На рис. 1 представлены типичные спектры НЕСГУ для образцов *n*-Si<Au> до и после нейтронного и γ -облучения. Как видно из рисунка (кривая 1), в образцах *n*-Si<Au>, не подвергнутых облучению в спектрах НЕСГУ, наблюдался один максимум с энергией термоионизации $E_c = (0.54 \pm 0.1)$ эВ и сечением за-

хвата носителей заряда $\sigma_n > 10^{-15}$ см², что соответствует параметрам центра Au⁻ в *n*-Si [5]. В спектрах *n*-Si<Au> после облучения (рис. 1, кривые 2—4) наблюдался ряд максимумов, связанных с центром Au⁻ и максимумами, обусловленными радиационными дефектами. Спектры, обусловленные радиационными дефектами (РД) в контрольных образцах *n*-Si, представлены на рис. 2. Из рис. 1 (кривые 2—4) и рис. 2 следует, что спектры НЕСГУ в *n*-Si<Au> и *n*-Si, облученных нейтронами с максимальной дозой $5 \cdot 10^{14}$ см⁻² и γ -излучением также с максимальной дозой 10^8 рад, имели практически одни и те же максимумы,

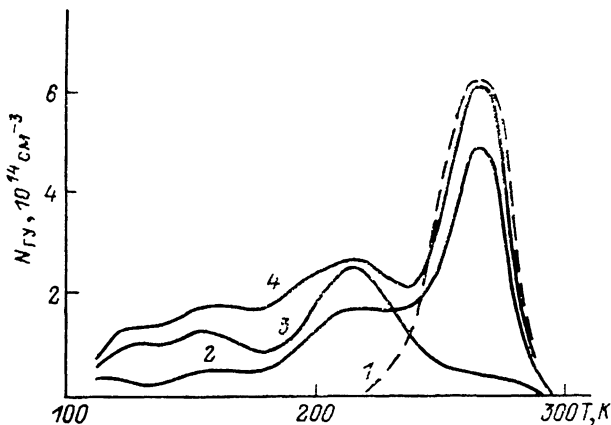


Рис. 1. Спектры НЕСГУ в образцах, легированных золотом до и после радиационного воздействия.

Времена выборки $t_1=9$, $t_2=90$ мс. 1 — необлученные образцы и облученные после отжига, 2, 3 — нейтронное облучение дозами $2.5 \cdot 10^{14}$ (2) и $5 \cdot 10^{14}$ см⁻² (3), 4 — γ -облучение дозой 10^8 рад.

обусловленные известными радиационными дефектами (см., например, [6, 7]). Концентрация РД возрастала линейно с увеличением дозы облучения, а наличие золота не оказывало влияния на скорость их введения. Необходимо отметить, что в результате воздействия γ -излучения на образцы *n*-Si<Au> не происходило взаимовлияния РД и центров золота. Отжиг при $T=550$ °С в течение 30 мин приводил к исчезновению максимумов, ответственных за РД, и не изменял высоты максимума, связанного с центром Au⁻.

Наиболее важным из полученных результатов является то, что нейтронное облучение начиная с доз 10^{14} см⁻² приводило к уменьшению концентрации центров Au⁻ (рис. 1, кривые 2, 3). Так, при дозе $\approx 5 \cdot 10^{14}$ см⁻² это уменьшение составляло $\sim 10^2$ по сравнению с первоначальной концентрацией центров

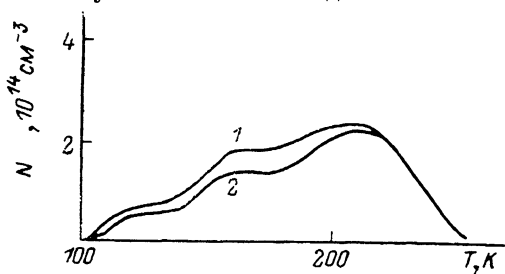


Рис. 2. Спектры НЕСГУ в облученных образцах, не легированных золотом.

Времена выборки $t_1=9$, $t_2=90$ мс. 1 — γ -облучение дозой 10^8 рад, 2 — нейтронное облучение дозой $5 \cdot 10^{14}$ см⁻².

Au⁻. Вместе с тем воздействие γ -излучения на *n*-Si<Au> не приводило к изменению концентрации Au⁻ для всех использованных доз. Отжиг *n*-Si<Au> после нейтронного облучения при $T=550$ °С в течение 30 мин приводил к практически полному восстановлению максимума, ответственного за центры Au⁻, и отжигу РД (рис. 1, кривая 1).

Значительное уменьшение электрически активных центров было также обнаружено в приповерхностной области *n*-Si<Au> при плазменной обработке его поверхности [8]. При этом, как и в нашем случае, после нейтронного воздействия не было обнаружено возникновения ГУ дефектов, включающих в себя атомы золота. Как считают авторы [8], наблюдаемое ими явление уменьшения центров Au обусловлено обогащением приповерхностных слоев кремния зо-

лотом с последующим удалением этого слоя в процессе плазменной обработки. Необходимо отметить, что наблюдаемое нами уменьшение концентрации центров Au^- при нейтронном воздействии происходило по всему объему образца в отличие от наблюдаемого в [8]. Причем это уменьшение сопровождалось образованием радиационных дефектов с концентрацией, не превышающей концентрацию РД, введенных γ -облучением, при котором, как отмечалось выше, не происходило уменьшение центров Au^- (рис. 1, 2). Однако необходимо отметить, что уменьшение центров Au^- при нейтронном воздействии происходит при дозах $> 10^{14} \text{ см}^{-2}$, т. е. при дозах, при которых происходит образование областей разупорядочения (см., например, [6, 7]). Таким образом, приведенные экспериментальные факты позволяют сделать следующие выводы о наблюдаемом нами уменьшении концентрации электрически активных центров Au^- в n -Si после нейтронного воздействия. Во-первых, это уменьшение не связано с образованием электрически неактивных комплексов с участием атомов золота и РД, так как такие комплексы должны были бы возникать и при

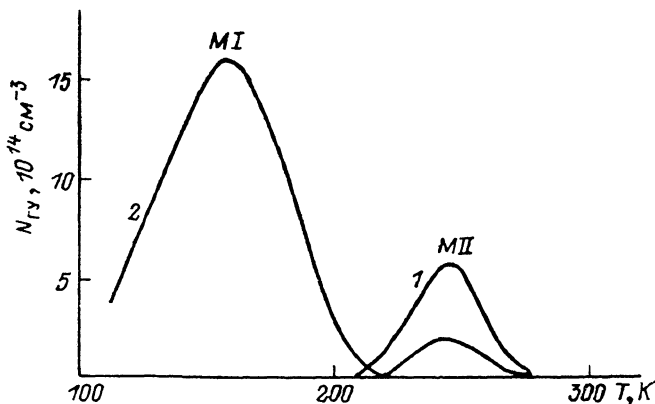


Рис. 3. Спектры НЕСГУ в образцах, легированных золотом.

Времена выборки $t_1=90$, $t_2=900$ мс. 1 — исходные образцы с травленной поверхностью, 2 — образцы со шлифованной поверхностью.

воздействию γ -облучения, о чем свидетельствуют одинаковые спектры точечных РД и их комплексов, возникающих при нейтронном γ -облучении (рис. 1, 2) (см., например, [6, 7]). Во-вторых, это уменьшение не связано с переходом электрически активных центров Au^- , находящихся в узле решетки кремния, в междоузельное состояние, считающееся электрически неактивным (см., например, [9, 10]), так как, на наш взгляд, кажется маловероятным переход центров золота из междоузлия в неравновесное узельное состояние при низкотемпературном отжиге (при $T=550^\circ\text{C}$ в течение 30 мин), при котором, как отмечалось выше, происходит восстановление почти до первоначальной высоты максимума в спектре НЕСГУ, связанного с узельным центром Au^- . В-третьих, все перечисленные факты и выводы убедительно, на наш взгляд, свидетельствуют о том, что наблюдаемое нами уменьшение электрически активных центров Au^- в n -Si обусловлено переходом их в новое электрически неактивное состояние, связанное с воздействием на них полей упругих напряжений, возникающих после нейтронного облучения кремния дозой более 10^{14} см^{-2} . Низкотемпературный отжиг приводит к снижению этих напряжений и восстановлению электрических свойств центров золота.

Этот вывод подтверждается также дополнительно проведенным простым экспериментом. После проведения диффузии золота в n -Si образцы разрезались на две части: одна подвергалась обработке в полирующем травителе, где удалялся слой ≈ 100 мкм, а другая шлифовалась на глубину ≈ 90 мкм с последующей химической полировкой до появления блестящей поверхности (еще утоньшена на глубину ≈ 10 мкм). После этого на обеих частях пластин создавались контакты Шоттки и производилось измерение НЕСГУ. Типичные спектры НЕСГУ для этих образцов приведены на рис. 3. Как следует из рис. 3,

в образцах, которые не шлифовались, наблюдался один максимум, характерный для центров Au^- . В образцах, которые подвергались шлифовке, наблюдалось два максимума (MI и MII). MI имел энергию термоионизации, сечение захвата электронов и энергию отжига, характерные для A -центров. Однако температурное положение MI в спектрах НЭСГУ не соответствует температурному положению максимумов, связанных с A -центрами, возникающими при γ -облучении. На наш взгляд, это несоответствие обусловлено дополнительным вкладом энтропийного фактора в предэкспоненциальный член формулы Аррениуса для времени релаксации, что может быть обусловлено изменением микроструктуры приповерхностного слоя кремния после проведения механической обработки поверхности. MII имел параметры, характерные для центра Au^- . Высота этого максимума была значительно ниже, чем в нешлифованном образце. Отжиг этих образцов при $T=550^\circ C$ в течение 1 ч приводил к увеличению концентрации электрически активных центров до концентрации, которая наблюдалась в образцах, не подвергнутых шлифовке, т. е. поля упругих напряжений, создаваемых шлифовкой, приводили к переходу центров Au^- в электрически неактивное состояние. Как следует из вышесказанного, низкотемпературный отжиг способствует снижению упругих напряжений, как и в случае образцов, подвергнутых нейтронному воздействию и восстановлению электрических свойств центров золота.

Природа электрически неактивного состояния центров золота может быть связана с изменением их динамического поведения [11]. Для объяснения такого поведения необходимо учитывать, что центр золота в кремнии, возможно, представляет собой туннелирующую систему [12]. Так, центр Au^- , который находится в узле решетки кремния, может совершать туннельные переходы в состояние Au^0 , которое характеризуется нецентральной расположением в решетке [13]. Возникновение полей упругих напряжений в результате нейтронного облучения большой дозы или механической обработки поверхности приводит к увеличению крутизны адиабатических потенциалов, что снижает вероятность туннелирования центров золота [12, 14]. Последнее обуславливает изменение динамических свойств этих центров и, как следствие, существование ранее неизвестного электрически неактивного состояния центров золота в кремнии.

Список литературы

- [1] Капустин Ю. А., Колокольников Б. М., Кузьмин Е. А., Минеев В. В., Постников В. С. // Электрон. техн. Сер. 3. Микроэлектроника. 1986. № 2 (118). С. 127—128.
- [2] Лебедев А. А., Султанов Н. А., Экке В. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 1. С. 18—21.
- [3] Абдурахманов К. П., Далиев Х. С., Лебедев А. А., Утамударова Ш. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 9. С. 1617—1619.
- [4] Лебедев А. А., Султанов Н. А. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 16—19.
- [5] Chen J. W., Milnes A. G. // Ann. Rev. Mater. Sci. 1980. V. 10. P. 157—228.
- [6] Винецкий В. А., Холодарь Г. А. Радиационная физика полупроводников. Киев, 1979. 334 с.
- [7] Смирнов Л. С. Физические процессы в облученных полупроводниках. Новосибирск, 1977. 256 с.
- [8] Ковешников С. В., Редькин С. В., Старков В. В., Юнкин В. А., Якимов Е. Б., Яркин Н. А. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1987. № 11. С. 85—88.
- [9] Wilcox W. R., Lachapelle T. J. // J. Appl. Phys. 1964. V. 35. N 1. P. 240—246.
- [10] Murooka M., Tomokage H., Kitagawa H., Yoshida M. // Japan. J. Appl. Phys. 1985. V. 24. N 2. P. 133—136.
- [11] Morante J. R., Careeller J. E., Cartujo P., Barbolla J. J. // Phys. St. Sol. (b). 1982. V. 111. P. 375—382.
- [12] Баграев Н. Т., Машков В. А. // Письма ЖЭТФ. 1984. Т. 39. В. 5. С. 211—213.
- [13] Постников В. С., Кириллов В. И., Капустин Ю. А., Аммер С. А., Козлов Ю. И. // ФТТ. 1978. Т. 20. В. 11. С. 3509—3511.
- [14] Постников В. С., Кириллов В. И., Капустин Ю. А., Борисов В. С. // ФТТ. 1985. Т. 27. В. 6. С. 1906—1908.