

ФОТОСТИМУЛИРОВАННАЯ ДИФФУЗИЯ ЗОЛОТА В КРЕМНИИ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ФОТОННОЙ ОБРАБОТКЕ

Капустин Ю. А., Колокольников Б. М., Свешников А. А.

Исследована диффузия золота в кремнии при импульсной фотонной обработке (ИФО) некогерентным светом ксеноновых ламп. Установлено, что при интенсивности ИФО > 100 Вт/см² и длительности $\sim 10^{-1}$ с введение золота в кремний происходит путем фотостимулированной диффузии. Предложен механизм наблюдаемого явления, учитывающий микроструктуру центров золота в *n*- и *p*-кремнии.

Ранее [1] нами установлено, что при импульсной фотонной обработке (ИФО) кремния некогерентным светом ксеноновых ламп в приповерхностном слое образцов происходят генерация пар Френкеля и образование А- и Е-центров при относительно низких температурах. В настоящей работе показана возможность введения примеси золота в кремний путем фотостимулированной диффузии (ФСД) при низкотемпературной ИФО ксеноновыми лампами.

В [2-4] сообщалось о низкотемпературной диффузии золота в кремний, стимулированной светом [2] и потоком электронов малой интенсивности [3]. Последующие попытки обнаружить радиационно-стимулированную диффузию (РСД) золота в кремнии были безуспешными, и было установлено [5-8], что эффект РСД, наблюдаемый в [2-4], является кажущимся и связан с адсорбцией золота на поверхности кремния при послойном снятии приповерхностных слоев образцов. Для избежания подобных эффектов в настоящей работе профили концентрации золота в кремнии определялись методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ) [9].

В качестве исходных образцов были выбраны пластины кремния *n*- и *p*-типа, выращенного по методу Чохральского, легированные фосфором и бором, соответственно с концентрацией свободных носителей $\approx 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Перед проведением ИФО пластины подвергались химико-механической полировке на глубину не менее 100 мкм. Окончательная толщина пластины составляла ≈ 400 мкм. Диффузия золота проводилась из слоя толщиной 0.2 мкм, напыленного на поверхность пластин. Воздействию ИФО подвергались также контрольные образцы, на поверхность которых золото не напылялось.

Мощность падающего на образец излучения при ИФО рассчитывалась по методике, приведенной в [10], и составляла ≈ 30 и ≈ 300 Вт/см², что значительно превышало интенсивность излучения, используемую в [2-8]. Температура образцов при этом изменялась в зависимости от длительности ИФО и рассчитывалась нами из уравнения теплового баланса [11], полученного в предположении, что контактный теплообмен отсутствует; конвенция пренебрежимо мала; площадь потока излучения превышает глубину его проникновения в образец; температура стенок рабочей камеры значительно ниже температуры нагреваемого образца; площадь облучаемых образцов намного больше толщины. На рис. 1 приведены полученные зависимости температуры исследуемых образцов от длительности ИФО.

С целью снижения термического фактора диффузии длительность ИФО была невысокой и составляла 0.5—1.8 с при мощности излучения 30 Вт/см² и 0.07—0.16 с при 300 Вт/см². При таких условиях ИФО температура образцов

не превышала 950 К (рис. 1) и распределялась равномерно по пластине [11]. Необходимо отметить, что экспериментально полученные значения температуры образцов при ИФО имели незначительное расхождение с расчетными.

После проведения ИФО непродиффундировавшее золото удалялось в «царской водке». Для измерения спектров НЕСГУ создавались барьеры Шоттки. Дополнительной термообработки при этом не производилось.

Исследование НЕСГУ в контрольных образцах показало, что воздействие ИФО с мощностью как 300, так и 30 Вт/см² приводит к возникновению А- и Е-центров, локализованных в приповерхностной области исследуемых кристаллов [1]. Воздействие ИФО с мощностью излучения 300 Вт/см² и длительностью 0.1 с на образцы n-Si с пленкой золота на поверхности приводило к возникновению дополнительного по сравнению с контрольными образцами n-Si максимума в спектре НЕСГУ (МЗ; рис. 2, кривая 1). Отжиг при T ≈ 750 К в течение 30 мин приводил, как и в контрольных образцах, к исчезновению М1 и М2, обусловленных А- и Е-центрами соответственно (рис. 2, кривая 2), и некоторому возрастанию МЗ. Энергия термooнизаии глубоких уровней (ГУ), ответственных за МЗ, составила E_c - 0.54 эВ, а сечение захвата электронов > 10¹⁶ см², что соответствует ГУ, создаваемым центрами Au⁻ в n-Si. В p-Si с пленкой золота на

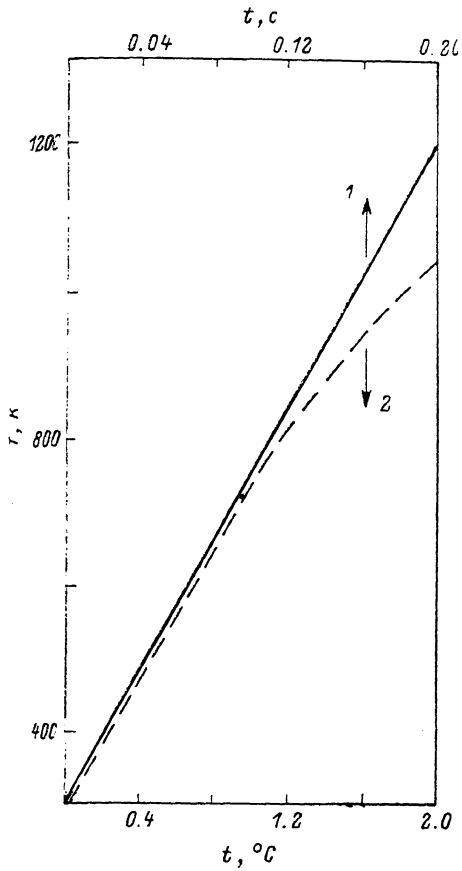


Рис. 1. Зависимость температуры образцов от длительности ИФО. Мощность излучения, Вт/см²: 1 — 300, 2 — 30.

поверхности ИФО с мощностью излучения 300 Вт/см² и длительностью 0.15 с приводил к введению ГУ с E_c + 0.35 эВ и сечением захвата дырок > 10⁻¹⁵ см², соответствующих центрам Au⁺ (рис. 2, кривая 3). На рис. 3 показаны типичные профили концентрации центров Au⁻ и Au⁺ в n- и p-Si соответственно, полученные для ИФО с мощностью излучения 300 Вт/см² и длительностью 0.15 с, что соответствовало температуре образцов ≈ 900 К. Проведение термической диффузии золота в кремний при такой температуре в течение времени, превышающего длительность импульса излучения на 2 порядка, не приводило к возникновению максимумов в спектрах НЕСГУ. Кроме того, диффузионные профили золота в кремнии, полученные в результате ИФО, не описывались erfс-функцией (рис. 3), как это неоднократно наблюдалось для термической диффузии золота в кремний и для диффузии в процессе ИФО при очень больших мощностях излучений и соответственно высоких температурах [12]. Необходимо отметить и тот факт, что диффузия золота в кремний не наблюдалась нами при мощности излучения 30 Вт/см² при всех исследованных длительностях ИФО, хотя температура образ-

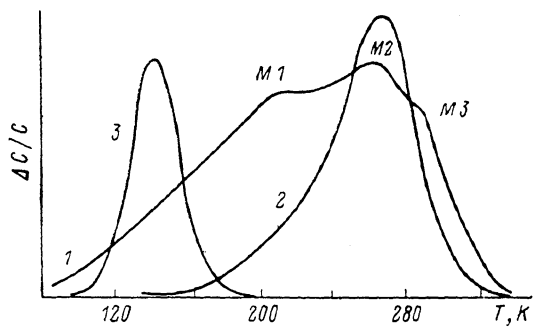


Рис. 2. Спектры НЕСГУ n-Si (1, 2) и p-Si (3), легированных золотом при ИФО. Времена выборки t₁ = 9 и t₂ = 90 мс; длительность импульсов заполнения 100 мкс; амплитуда смещения 3 В.

поверхности ИФО с мощностью излучения 300 Вт/см² и длительностью 0.15 с приводил к введению ГУ с E_c + 0.35 эВ и сечением захвата дырок > 10⁻¹⁵ см², соответствующих центрам Au⁺ (рис. 2, кривая 3). На рис. 3 показаны типичные профили концентрации центров Au⁻ и Au⁺ в n- и p-Si соответственно, полученные для ИФО с мощностью излучения 300 Вт/см² и длительностью 0.15 с, что соответствовало температуре образцов ≈ 900 К. Проведение термической диффузии золота в кремний при такой температуре в течение времени, превышающего длительность импульса излучения на 2 порядка, не приводило к возникновению максимумов в спектрах НЕСГУ. Кроме того, диффузионные профили золота в кремнии, полученные в результате ИФО, не описывались erfс-функцией (рис. 3), как это неоднократно наблюдалось для термической диффузии золота в кремний и для диффузии в процессе ИФО при очень больших мощностях излучений и соответственно высоких температурах [12]. Необходимо отметить и тот факт, что диффузия золота в кремний не наблюдалась нами при мощности излучения 30 Вт/см² при всех исследованных длительностях ИФО, хотя температура образ-

цов при длительности ИФО > 1.5 с превышала температуру, достигаемую при мощности излучения 300 Вт/см^2 и длительности 0.15 с, при которых осуществлялось введение золота в кремний.

Из полученных результатов следует выделить наиболее важные, на наш взгляд, закономерности диффузии золота в кремнии при низкотемпературной ИФО: 1) диффузия наблюдается только при достаточно высокой интенсивности ИФО ($> 100 \text{ Вт/см}^2$) и относительно низких температурах ($\leq 900 \text{ K}$); 2) профили концентрации имеют аномальный характер (рис. 3); 3) скорость диффузии в n -Si значительно выше, чем в p -Si; 4) диффузия сопровождается образованием вакансионных комплексов и, следовательно, пар Френкеля. Перечисленные экспериментальные факты и закономерности, на наш взгляд, убедительно свидетельствуют о том, что введение золота в кремний при используемых условиях ИФО происходит путем фотостимулированной диффузии ФСД.

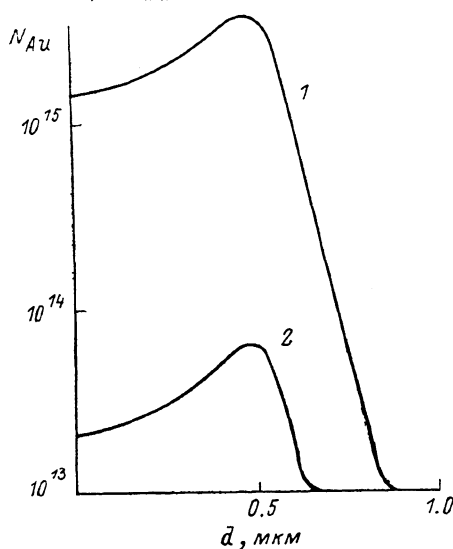


Рис. 3. Профили концентрации центров золота в n -Si (1) и p -Si (2) после ИФО с мощностью излучения 300 Вт/см^2 и длительностью 0.15 с.

Наиболее вероятными, по нашему мнению, механизмами ФСД золота в кремнии являются механизм θ -вспышки [13] и электрон-фононный механизм [14]. Однако с помощью первого, на наш взгляд, труднее объяснить значительную разницу в скорости диффузии центров золота в n - и p -Si (рис. 3). Электрон-фононный механизм (ЭФМ), напротив, удовлетворительно объясняет это явление.

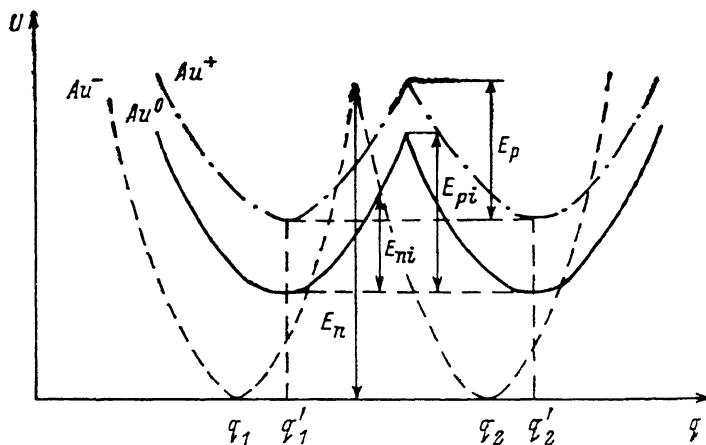


Рис. 4. Конфигурационно-координационные диаграммы центров Au^- , Au^+ и Au^0 .

ние. Рассмотрим это с помощью метода конфигурационно-координационных диаграмм (ККД). Так, ИФО приводит к фотоионизации центров Au^- , находящихся в узле решетки n -Si (конфигурационная координата $q=q_1$ на рис. 4), и переходу их в состояние Au^0 , характеризующееся нецентральной (типа ян-теллеровского) расположением в решетке кремния [15-17] ($q=q'_1$ на рис. 4), которое контролируется электрон-фононным взаимодействием. Как следует из рис. 4, в результате этой реакции величина миграционного барьера, необходимого для перехода центра золота в соседнюю кристаллографическую ячейку (в положение с $q=q'_2$

на рис. 4), снижается от E_n до E_{ni} . Очевидно, что наряду с увеличением вероятности перехода центра золота в соседнюю ячейку Si необходимо удаление из нее атома кремния. В [1] нами показано, что при используемых условиях ИФО в приповерхностной области кремния происходит образование пар Френкеля, что подтверждает возможность ФСД золота в кремнии путем ЭФМ.

В [17] предложена модель центра золота с отрицательной энергией электронной корреляции. ККД, связанная с фотоионизацией центров золота в n -Si и переходом их в состояние Au^0 , приведена на рис. 5, из которого следует, что и в этом случае величина миграционного барьера центров золота (E_{ni}) в n -Si при ИФО значительно ниже, чем при обычной диффузии (E_n).

Совершенно иная ситуация наблюдается в p -Si, так как конфигурационная координата центров Au^+ в p -Si не меняется при захвате ими электрона из валентной зоны при ИФО и переходе в состояние Au^0 [15-17]. Как следует из рис. 3,

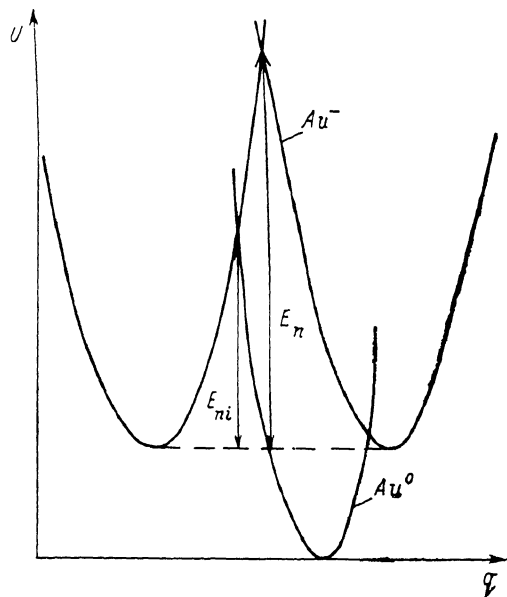


Рис. 5. Конфигурационно-координационные диаграммы центров золота с отрицательной энергией электронной корреляции в n -Si.

интенсивность ФСД центров золота в p -Si значительно ниже, чем в n -Si. Это объясняется тем, что центры Au^+ и Au^0 занимают нецентральное положение в решетке Si и имеют одну и ту же конфигурационную координату [15-17] ($q=q_1'$ или $q=q_2'$ на рис. 2). Поэтому при переходе центров золота из состояния Au^+ в состояние Au^0 при захвате фотоэлектронов, образующихся в процессе ИФО, происходит изменение только потенциальной энергии центра без изменения конфигурационной координаты (рис. 4). Как следует из рис. 4, изменение миграционного барьера $E_{pi} - E_p$ при этом будет незначительным, что объясняет значительно более низкую скорость ФСД в p -Si по сравнению с n -Si, как это следует из рис. 2.

Список литературы

- [1] Капустин Ю. А., Колокольников Б. М., Свешников А. А., Злобин В. П. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 9. С. 1708—1711.
- [2] Зюзь Л. Н., Кив А. Е., Ниязова О. Р., Умарова Ф. Т. // Письма ЖЭТФ. 1970. Т. 12. В. 5. С. 213—215.
- [3] Зайковская М. А., Ниязова О. Р., Климова О. А. // ФТП. 1971. Т. 5. В. 5. С. 911—914.
- [4] Зюзь Л. Н., Кив А. Е., Ниязова О. Р., Умарова Ф. Т. // Письма ЖЭТФ. 1973. Т. 17. В. 5. С. 230—231.
- [5] Малкович Р. Ш., Нистирюк Н. В. // Письма ЖЭТФ. 1973. Т. 17. В. 1. С. 3—4.
- [6] Малкович Р. Ш., Нистирюк И. В., Савин Г. Г. // ФТТ. 1975. Т. 17. В. 1. С. 2415—2417.
- [7] Дидик В. А., Малкович Р. Ш. // ФТТ. 1977. Т. 19. В. 9. С. 1825—1829.
- [8] Cheng L. J., Süla M., Kowall J. P., Wallace P. W., Corbett J. W. // Phys. St. Sol. (a). 1976. V. 38. N 1. P. 321—330.
- [9] Lang D. V. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 7. P. 3023—3032.
- [10] Мозоловская А. Н. // Теплофизические и физико-химические процессы в энергетических установках. Минск, 1986. С. 118—122.
- [11] Лабунов В. А., Борисенко В. Е., Грибковский В. А. // Зарубежн. электрон. техн. 1983. № 1. С. 3—57.
- [12] Antonova I. V., Kadurchunov K. B., Nidaev E. V., Smirnov L. S. // Phys. St. Sol. 1983. V. A76. N 2. P. 213—216.

- {13] Ленченко В. М. // ФТП. 1969. Т. 3. В. 11. С. 799—801.
{14] Вяхнин В. С., Шейнкман М. К. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 9. С. 1577—1584.
{15] Постников В. С., Кириллов В. И., Капустин Ю. А., Аммер С. А., Козлов Ю. А. // ФТТ. 1978. Т. 20. В. 11. С. 3509—3511.
{16] Lowther J. E. // J. Phys. C: Sol. St. Phys. 1980. V. 13. N 19. P. 3665—3680.
{17] Баграев Н. Т., Машков В. А. // Письма ЖЭТФ. 1984. Т. 39. В. 5. С. 211—213.

Воронежский технологический институт

Получена 7.06.1989
Принята к печати 16.10.1989