

Изучение процессов образования дефектов в кремнии, легированном редкоземельным элементом

Ш.Б.Утамуродова
Институт физики полупроводников и
микроэлектроники Национального
университета Узбекистана,
Ташкент, Узбекистан
sh-utamuradova@yandex.ru

Ж.Ж.Хамдамов
Институт физики полупроводников и
микроэлектроники Национального
университета Узбекистана,
Ташкент, Узбекистан
jonibek.uzmu@mail.ru

М.Б.Бекмуратов
Институт физики полупроводников и
микроэлектроники Национального
университета Узбекистана,
Ташкент, Узбекистан
mans-bek@mail.ru

Аннотация — В данной работе исследуется влияние электронного облучения на процессы дефектообразования в кремнии, легированном иттербием. Рассмотрены два метода легирования кремния: выращивание из расплава и диффузионный метод. Использование нестационарной емкостной спектроскопии (DLTS) на диодных структурах позволило оценить поведение кремния с примесью иттербия в условиях радиационного воздействия. Облучение образцов электронами с энергиями 6 и 13 МэВ привело к образованию радиационных дефектов, таких как А-центры и Е-центры. Результаты показали, что легирование кремния иттербием значительно снижает концентрацию этих дефектов, особенно в образцах, легированных диффузионным методом. Наибольшее снижение наблюдается в «бескислородном» кремнии, где концентрация А-центров и Е-центров уменьшилась в несколько раз по сравнению с контрольными образцами. Эти результаты подтверждают, что атомы иттербия в кремнии взаимодействуют с радиационными дефектами, создавая кластеры, которые служат эффективными стоками для вакансий, что замедляет процесс дефектообразования. Работа предоставляет новые данные о возможностях улучшения радиационной устойчивости кремниевых материалов, легированных редкоземельными элементами.

Ключевые слова — кремний, иттербий, дефектообразование, электронное облучение, радиационные дефекты, DLTS.

I. ВВЕДЕНИЕ

Поведение материалов при облучении во многом определяется природой и концентрацией примесей, взаимодействующих с первичными радиационными дефектами [1-3]. Особый интерес представляют исследования воздействия облучения на кристаллы, в которые, помимо основной легирующей примеси, введены дополнительные примеси, как электрически активные, так и электронейтральные [4-5]. Легирование монокристаллического кремния редкоземельными элементами (РЗЭ) повышает устойчивость его параметров к радиационному воздействию [6-7]. Этот эффект объясняется присутствием в решетке кремния различных включений РЗЭ, которые служат эффективными стоками для вакансий, созданных облучением. Однако в литературе нет единого мнения об электрической активности примесей РЗЭ и их взаимодействии с радиационными дефектами и другими примесями в кремнии.

Цель данной работы исследование влияния электронного облучения на процессы дефектообразования в кремнии, легированном иттербием как в процессе выращивания из расплава, так и диффузионным методом.

Исследования проводились с использованием нестационарной емкостной спектроскопии (DLTS) на диодных структурах, изготовленных на образцах контрольного кремния и кремния с примесью иттербия [8-9]. Содержание атомов иттербия в объеме монокристаллического кремния, легированного при выращивании, определялось методом нейтронно-активационного анализа и варьировалось от 10^{15} см^{-3} до 10^{17} см^{-3} [10]. Контрольные образцы представляли собой n-Si с различным содержанием кислорода: «кислородный» кремний с концентрацией оптически активных атомов кислорода $N_{0\text{опт}} = 4 \cdot 10^{17} - 1.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и «бескислородный» кремний с $N_{0\text{опт}} \leq 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Облучение образцов проводилось на электронном ускорителе электронами с энергиями 6 и 13 МэВ. После каждого цикла облучения измерялись удельное сопротивление и концентрация носителей тока [11-12].

Анализ спектров DLTS показал, что введение иттербия в кремний в процессе выращивания из расплава не приводит к образованию глубоких уровней в запрещенной зоне, несмотря на высокую концентрацию атомов иттербия. В образцах, легированных иттербием диффузионным методом, был обнаружен глубокий уровень с энергией ионизации $E_c - 0.36 \text{ эВ}$.

После облучения электронами в контрольных образцах n-Si с высоким содержанием кислорода наблюдалось образование А-центров (комплексы вакансия-кислород) с энергией ионизации $E_c = 0.17 \text{ эВ}$. В образцах с низким содержанием кислорода наблюдались как А-центры, так и Е-центры (комплексы вакансия-фосфор) с энергией ионизации $E_c = 0.43 \text{ эВ}$.

Присутствие атомов иттербия в кремнии значительно снижает концентрацию А- и Е-центров по сравнению с контрольными образцами. В образцах, легированных иттербием в процессе выращивания, концентрация А-центров уменьшилась в 2-3 раза, а в образцах, легированных диффузионным методом, — в 5-6 раз. В «бескислородном» кремнии с примесью иттербия концентрация А-центров была в 2-3 раза меньше, чем в «кислородном» кремнии, а концентрация Е-центров — на порядок меньше.

Эти эффекты объясняются взаимодействием атомов иттербия с радиационными дефектами. Атомы РЗЭ в кремнии могут образовывать кластеры, которые служат стоками для вакансий, что замедляет процесс радиационного дефектообразования. Также возможно, что часть атомов иттербия находится в дисперсном состоянии и может служить центрами аннигиляции дефектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Присутствие атомов иттербия в кремнии значительно снижает эффективность образования радиационных дефектов, таких как А-центры и Е-центры. Величина этого снижения зависит от состояния атомов иттербия в решетке кремния. Наблюдаемые эффекты связаны с особенностями взаимодействия атомов иттербия с дефектами и примесями, такими как кислород и углерод, а также с радиационными дефектами, вводимыми облучением.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Vavilov, V.S. Radiation effects in semiconductors and semiconductor devices / V.S. Vavilov, N.A. Ukhin. – Moscow: Atomizdat, 1968. – 312 p. – (in Russian).
- [2] Shakhovtsov, V.I. Radiation effects in solids / V.I. Shakhovtsov, V.L. Shindich. – Kiev: Naukova Dumka, 1977. – P. 88–102. – (in Russian).
- [3] Physical Processes in Irradiated Semiconductors / ed. by S. Smirnova. – Novosibirsk: Nauka, 1977. – 256 p. – (in Russian).
- [4] Lebedev, A.A. Study of the effect of γ -irradiation on the properties of n-Si<Mn> using DLTS / A.A. Lebedev, Sh.B. Utamuradova, K.P. Abdurakhmanov, Kh.S. Dailev // Semiconductors. – 1985. – Vol. 19, No. 9. – P. 1617–1619.
- [5] Utamuradova, Sh.B. Formation of radiation defects in silicon doped with vanadium / Sh.B. Utamuradova, Kh.S. Dailev, Sh.Kh. Dailev, Sh.B. Norkulov // Science and World. – 2018. – Vol. I, No. 5 (57). – P. 8–10.
- [6] Antonenko, R.S. Radiation effects in silicon doped with gadolinium / R.S. Antonenko, S.I. Komyushin, V.I. Shakhovtsov [et al.] // Physics and Technology of Semiconductors. – 1976. – Vol. 8, No. 10. – P. 1583–1586.
- [7] Karpov, Yu.A. Radiation defects in erbium-doped silicon / Yu.A. Karpov, V.V. Petrov, V.S. Prosolovich, V.D. Tkachev // Physics and Technology of Semiconductors. – 1983. – Vol. 8, No. 18. – P. 1530–1532.
- [8] Utamuradova, Sh. Electrophysical properties of Silicon doped by Nickel impurity using Diffusion method / Sh. Utamuradova, S.S. Nasriddinov, Sh. Ismollov // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. – 2020. – Vol. 8, No. 7. – P. 3513–3518.
- [9] Utamuradova, Sh.B. Features of the Formation of Impurity-Defective Centers in Silicon Doped with Chromium / Sh.B. Utamuradova, Sh.Kh. Dailev, Y.R. Ravshanov, K.M. Fayzullaev // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. – 2020. – Vol. 8, No. 9. – P. 5506–5509.
- [10] Dailev, Sh.Kh. Energy Spectrum of Defective Centers in Silicon Doped with Molybdenum / Sh.Kh. Dailev, Sh.P. Usmanova, A.D. Paluanova // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. – 2020. – Vol. 8, No. 9. – P. 6222–6325.
- [11] Berman, L.S. Capacitive spectroscopy of deep centers in semiconductors / L.S. Berman, A.A. Lebedev. – Leningrad: Nauka, 1981. – 170 p. – (in Russian).
- [12] Miller, G.L. Capacitance transient spectroscopy / G.L. Miller, D.V. Lang, L.C. Kimerling // Annual Review of Materials Science. – 1977. – Vol. 7. – P. 377–448.