

МРНТИ 29.19.16

<https://doi.org/10.26577/RCPH.2022.v80.i1.04>

Д.О. Мурзалинов*, Б.А. Ракыметов,
Б.А. Байтимбетова, А.А. Шайкенова,
Д.А. Муратов

Satbayev University, Физико-технический институт, Казахстан, г.Алматы
*e-mail: dan_collaps@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ ПАРАМАГНИТНЫХ ЦЕНТРОВ НИТРИДА КРЕМНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Исследование процесса формирования парамагнитных светоизлучающих частиц на основе материала, хорошо интегрированного в планарную кремниевую технологию, является актуальной задачей. Нитрид кремния широко используется в качестве изолирующего и пассивирующего слоя благодаря диэлектрическим свойствам и из-за высокого энергетического барьера на границе раздела сред. Методом PECVD были получены образцы $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$, в которых обнаружены парамагнитные центры. Особенностью этого метода является осаждение при низких температурах (250–300 °С), что приводит к образованию связей с водородом. При дальнейшем отжиге водород испаряется и образуются частицы с оборванными связями. Интересным является факт обнаружения сигнала в слабых полях. Длительный печной отжиг в среде Ar при 800 °С не изменяет параметры сигнала между третьей и четвертой компонентой марганца, однако сигнал в слабых полях снижается. Термическая обработка при 1100 °С в среде Ar преобразует сигнал между третьей и четвертой компонентой марганца и восстанавливает сигнал в слабых полях. Природа данных сигналов соответствует суперпозиции К и N излучательных центров. В зависимости от температуры отжига образца сигнал в слабых полях существенно уменьшается.

Ключевые слова: метод PECVD, нитрид кремния, термическая обработка, парамагнитные центры, оборванные связи.

D.O. Murzalinov*, B.A. Rakymetov,
B.A. Baitimbetova, A. Shaikenova, D.A. Muratov
Satbayev University, Institute of Physics and Technology, Kazakhstan, Almaty
*e-mail: dan_collaps@mail.ru

Determination of the properties of paramagnetic centers of silicon nitride, under various conditions of heat treatment

Investigation of the process of formation of paramagnetic light-emitting particles based on the material. Silicon nitride is widely used as an insulating and passivating layer due to its dielectric properties **and due to its high interface barrier. The PECVD method was used to obtain $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ samples, in** which paramagnetic centers were found. A feature of this method is deposition at low temperatures (250–300 °C), which leads to the formation of bonds with hydrogen. Upon further annealing, hydrogen evaporates and dangling particles are formed. An interesting fact is the detection of a signal in weak fields. Long-term furnace annealing in Ar at 800 °C does not change the signal parameters between the third and fourth manganese components; however, the signal in weak fields decreases. Heat treatment at 1100 °C in an Ar medium converts the signal between the third and fourth manganese components and restores the signal in weak fields. The nature of the data corresponds to the signals of the superposition of K and N emitting centers. Depending on the sample annealing temperature, the signal in weak fields is insignificant.

Key words: PECVD method, silicon nitride, heat treatment, paramagnetic centers, dangling bonds.

Д.О. Мурзалинов*, Б.А. Рақыметов,
Б.А. Байтімбетова, А. Шайкенова, Д.А. Мұратов
Satbayev University, Физика-техникалық институты, Қазақстан, Алматы қ.
*e-mail: dan_collaps@mail.ru

Термиялық өңдеудің әртүрлі жағдайларында кремний нитридінің парамагниттік орталықтарының қасиеттерін анықтау

Планарлы кремний технологиясына жақсы біріктірілген материал негізінде парамагниттік жарық шығаратын бөлшектерді қалыптастыру процесін зерттеу өзекті мәселе болып табылады. Кремний нитриді диэлектрлік қасиеттеріне байланысты және интерфейстегі энергияның жоғары тосқауылына байланысты оқшаулағыш және пассивті қабат ретінде кеңінен қолданылады. PECVD әдісімен парамагниттік орталықтар табылған $\text{SiN}_x / \text{SiO}_2 / \text{Si}$ үлгілері алынды. Бұл әдістің ерекшелігі-төмен температурада тұндыру ($250\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$), бұл сутегімен байланыстың пайда болуына әкеледі. Қосымша күйдіру кезінде сутегі буланып, ілінетін бөлшектер пайда болады. Әлсіз өрістерде сигналды анықтау фактісі қызықты. $800\text{ }^\circ\text{C}$ температурада Ag ортасында ұзақ уақыт пешті тазарту марганецтің үшінші және төртінші компоненті арасындағы сигнал параметрлерін өзгертпейді, бірақ әлсіз өрістердегі сигнал азаяды. Ag ортасында $1100\text{ }^\circ\text{C}$ кезінде термиялық өңдеу марганецтің үшінші және төртінші компоненті арасындағы сигналды түрлендіреді және әлсіз өрістерде сигналды қалпына келтіреді. Бұл сигналдардың табиғаты К және N сәулелену орталықтарының суперпозициясына сәйкес келеді. Бұл сигналдардың табиғаты К және N шығаратын орталықтардың суперпозициясына сәйкес келеді. Үлгінің күйдіру температурасына байланысты әлсіз өрістердегі сигнал айтарлықтай төмендейді.

Түйін сөздер: PECVD әдісі, кремний нитрид, термиялық өңдеу, парамагниттік орталықтар, ілулі байланыстар.

Введение

Нитрид кремния широко используется в качестве изолирующего и пассивирующего слоя благодаря диэлектрическим свойствам и из-за высокого энергетического барьера на границе раздела сред [1].

Известно, что Si_3N_4 обладает высокой концентрацией ловушек, которые могут локализовывать инжектированные заряды (как электроны, так и дырки) в течение длительного времени (около 10 лет) при комнатной температуре (300 K). Типичная плотность ловушек в Si_3N_4 составляет $5 \cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$ [2]. Данный эффект широко используется в устройствах программируемой памяти (EEPROM) [3].

Метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) дает возможность определения дефектного состава монокристаллического (с-Si), аморфного (а-Si) кремния, пленок SiO_x , а также границ раздела сред в многослойных образцах [4]. Часть из дефектов являются ловушками для заряда.

Плазменно химическое осаждение из паровой фазы (PECVD) – это технология формирования тонких пленок, путем генерации активных радикалов и ионов на подложке через превращение реакционноспособного газа в плазменное состояние. Особенностью этого метода является

осаждение при низких температурах ($250\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$), что приводит к образованию связей с водородом. При дальнейшем отжиге водород испаряется и образуются частицы с оборванными связями.

Метод

Нитридный слой в структурах $\text{SiN}_x / \text{SiO}_2 / \text{Si}$ получен методом плазменно-активированного газофазного химического осаждения из смеси моносилана (SiH_4) и аммиака (NH_3) [5]. Оксидный слой, выращенный для компенсации механических напряжений между кремнием и нитридом кремния, также получен методом плазменно-активированного газофазного химического осаждения из смеси тетраэтоксисилана $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si}$ и кислорода (O_2) [6]. В качестве подложки использовалась термически окисленная пластина кремния марки КЭФ 4,5 кристаллографической ориентации (100) диаметром 300 мм. Температура подложки при осаждении нитридного слоя составляла $300\text{ }^\circ\text{C}$. Толщина и показатель преломления нитридного слоя, измеренные эллипсометрическим методом, составляли 588 нм и 1,87 соответственно [7-10].

Из изготовленных структур вырезались образцы $1 \times 1\text{ см}^2$, которые затем использовались для оптических и структурных исследований.

Отжиг проходил в течении в среде Ag при температурах 800°C и 1000°C в течении 1 часа [11].

Результаты

На рисунке 1 приведены ЭПР спектры нитрида кремния, полученного методом PECVD. Спектр снят в развертке 150000 mT [12].

Видно, что положение и форма линий между колебаниями марганца симметричны с g – факторами: $g=2.11639$, $g=2.05562$, $g=2.00858$,

$g=1.94954$. Амплитуда модуляции у всех спектров одинакова. Для сигналов с очень узкими линиями высокая частота модуляции может привести к уширению линий [13].

Видно, что положение и форма линий между колебаниями марганца симметричны с g – факторами: $g=2.11639$, $g=2.05562$, $g=2.00858$, $g=1.94954$. Амплитуда модуляции у всех спектров одинакова. Для сигналов с очень узкими линиями высокая частота модуляции может привести к уширению линий [13].

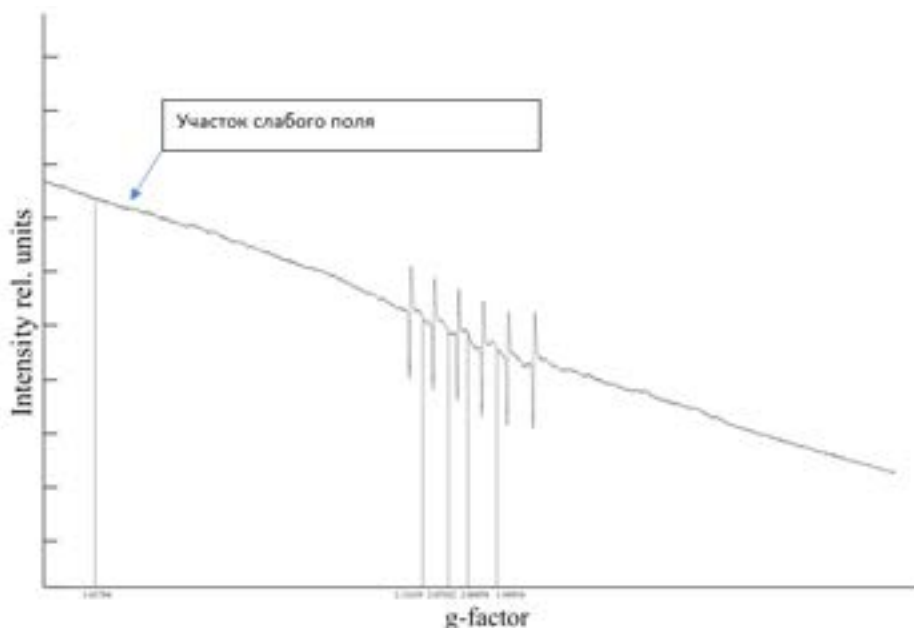


Рисунок 1 – Спектр ЭПР в развертке 150000 mT

Известно, что в нестехиометрическом нитриде кремния существуют дефекты, представляющие собой атомы кремния с оборванной связью (К-центр). Энергетические уровни таких дефектов расположены вблизи середины запрещенной зоны. Логично предположить, что таких дефектов будет больше в нитриде кремния с избытком кремния [14-15]. В случае образца с избытком азота, отжиг может приводить к формированию, так называемых N-центров, уровни которых располагаются ближе ко дну валентной зоны (рис.2, 3) [16].

В пределах запрещенной зоны по уровням энергий распределено большое количество таких ловушек (K и N центров) [17-18]. Если эти локальные уровни (ловушки), находятся вблизи дна валентной зоны, то вероятность обратного

теплового перехода электрона в валентную зону с локального уровня гораздо выше, чем вероятность захвата заряда из зоны проводимости и рекомбинации его на этом локальном уровне.

Иначе развивается процесс вблизи середины запрещенной зоны, т.е. на глубоких локальных уровнях. Для теплового перехода электрона с такого уровня в зону проводимости, электрон должен поглотить одновременно несколько фононов, так как энергии одного для такого перехода недостаточно. Вероятность поглощения многих фононов одним электроном незначительна, значит, незначительна и вероятность перехода электрона в зону проводимости. Тогда более вероятными становятся захват дырки локальным уровнем, заполненным электронами, и рекомбинация ее с находящимся там электроном.

Важно также, что вероятность встречи дырки с неподвижным электроном, находящимся на глубоком локальном уровне, значительно выше вероятности встречи ее с подвижным электроном. Поэтому глубокий локальный уровень является эффективным центром рекомбинации, а в полу-

проводниках с широкой запрещенной зоной этот вид рекомбинации преобладает. В процессе рекомбинации участвуют все локальные уровни, однако ведущая роль принадлежит лишь наиболее близко расположенным к собственному уровню Ферми.

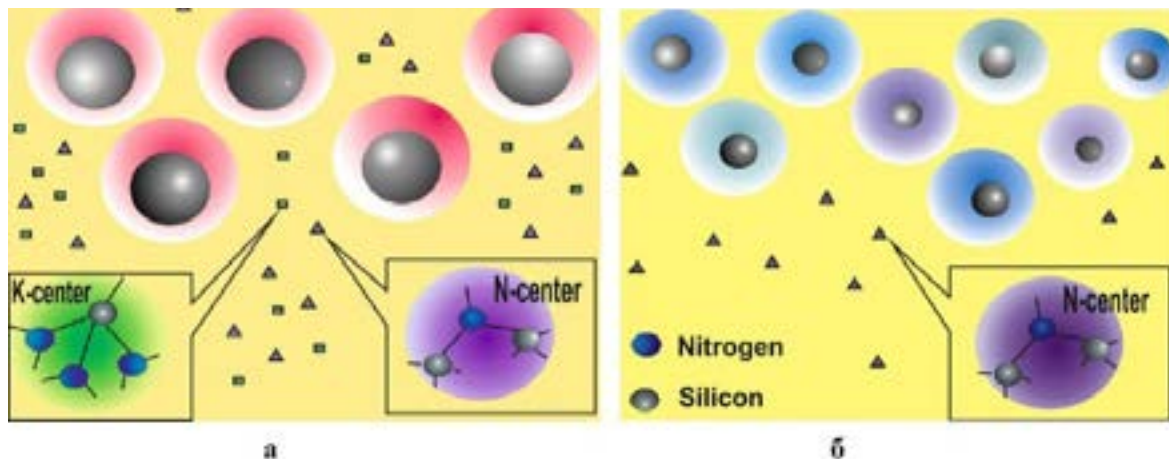


Рисунок 2 – Типичные парамагнитные центры нитрида кремния

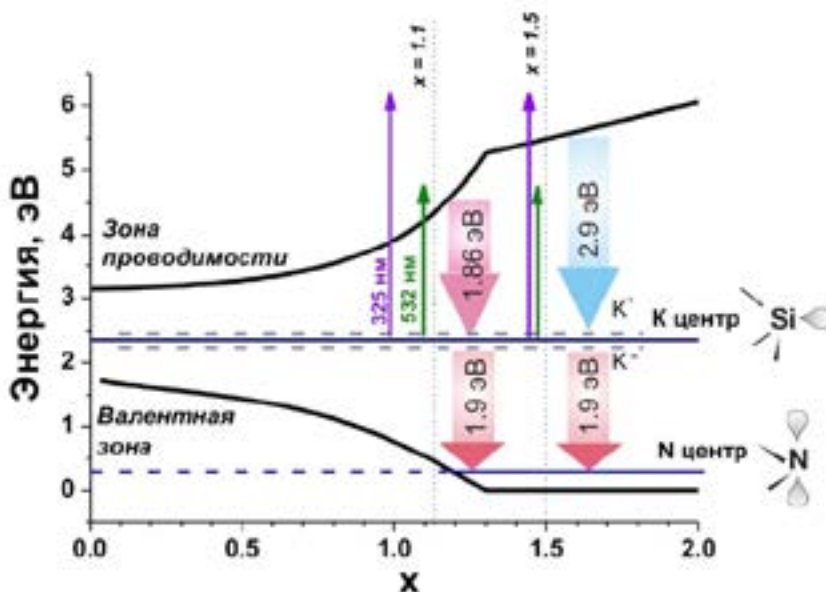


Рисунок 3 – Модель излучательных переходов

Процесс протекания заряда по ловушкам сводится к энергичному обмену электронами таких близко лежащих локальных уровней.

На спектре при развертке 50000 мТ (рис. 4) видно, что между всеми компонентами ионов

марганца имеются сигналы ЭПР. Это является нетипичным для спектра марганца, что может быть связано с возрастанием центров безызлучательной рекомбинации обусловленных процессом плазменного осаждения [19].

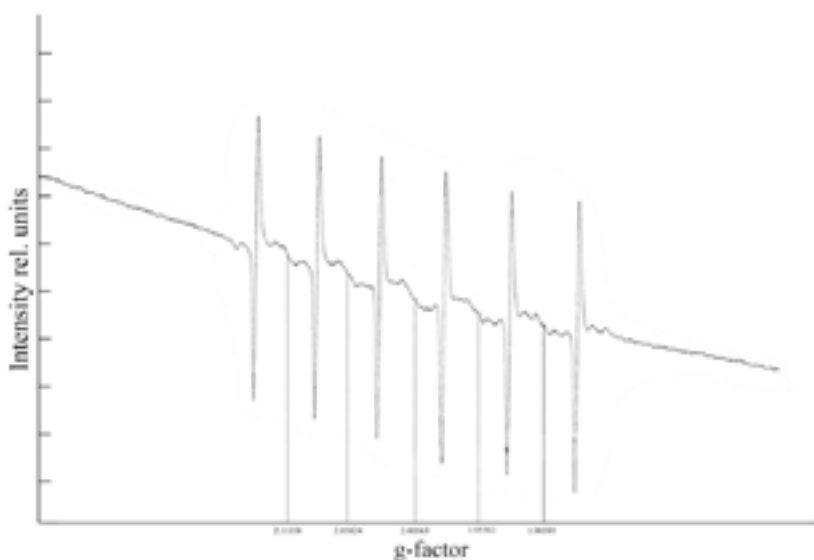


Рисунок 4 – Спектр ЭПР SiN_{1,1} в развертке 50000 мТ

Запись на различных развертках показывает, что между каждой компонентой марганца имеется спектр ЭПР [20], обусловленный в большей степени природой образца, а не эффектами прохождения магнитного поля.

Однако наиболее интересный сигнал находится между третьей и четвертой компонентами марганца (рис. 5).

Спектр состоит как минимум из двух линий – узкой и широкой. Узкая линия имеет следующие параметры: $g=2,01432$, $\Delta H=13\text{mT}$. Параметры широкой линии: $g=2,0058$, $\Delta H=51,6\text{mT}$.

Рассмотрим спектры образца PECVD SiN_{1,1} после отжига 800°C в течении 60 мин., в среде Ar [21-24].

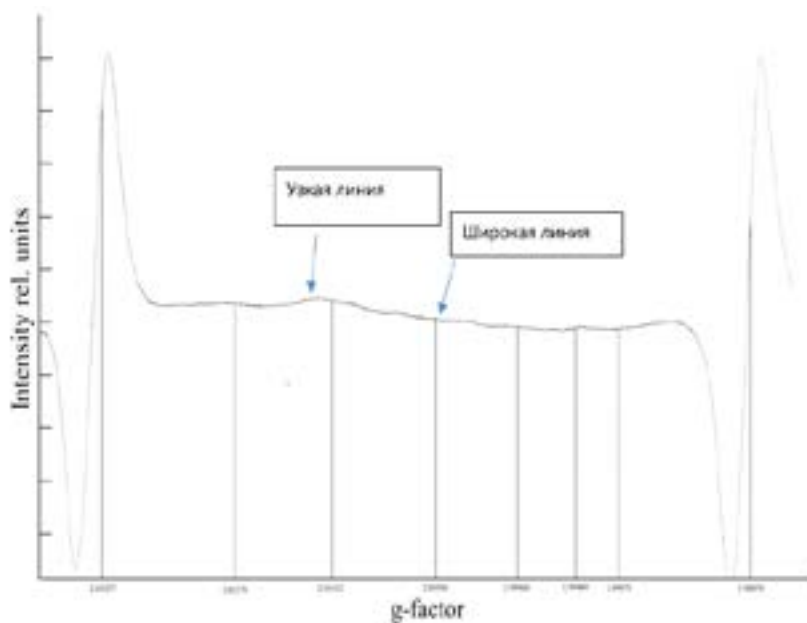


Рисунок 5 – Спектр ЭПР SiN_{1,1} в развертке 5000 мТ

В данном случае происходит увеличение концентрации К- и N-центров в результате разрыва Si-H и N-H связей и конкурирующий процесс аннигиляции дефектов в процессе термообработки [25].

Как видно из рисунках 6 и 7 интенсивность сигнала в слабых полях существенно уменьшилась.

Параметры спектра между 3 и 4 компонентами марганца после отжига существенно не изменились (рис. 8): узкая линия – $\Delta H=12,9\text{mT}$, $g=2,0145$, широкая линия – $\Delta H=51,6\text{mT}$, $g=2,0064$.

Рассмотрим образец $\text{SiN}_{1,1}$, после отжига при 1100°C в течении 120 мин в среде Ar (рис. 9-10).

Следует отметить, что между третьей и четвертой компонентами марганца (рис. 10) наблюдаем сигнал, амплитуда которого больше чем между остальными линиями марганца.

На рисунке 11 изображен спектр ЭПР образца между третьей и четвертой компонентами марганца [26]. На нем заметны две линии ЭПР: узкая и широкая. Параметры узкой линии – $\Delta H=17\text{ mT}$, $g=2,0138$, параметры широкой линии – $\Delta H=38,7\text{ mT}$, $g=2,0073$.

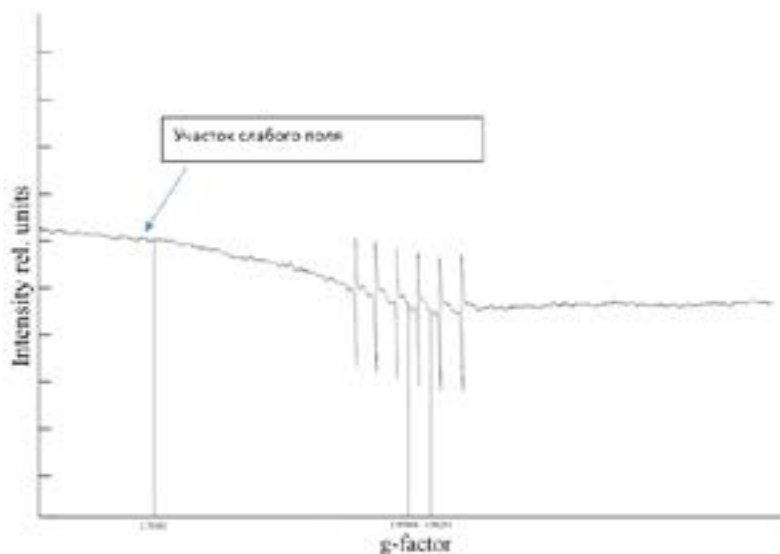


Рисунок 6 – Спектр ЭПР $\text{SiN}_{1,1}$ (800°C , 60 min, Ar) в развертке 150000 мТ

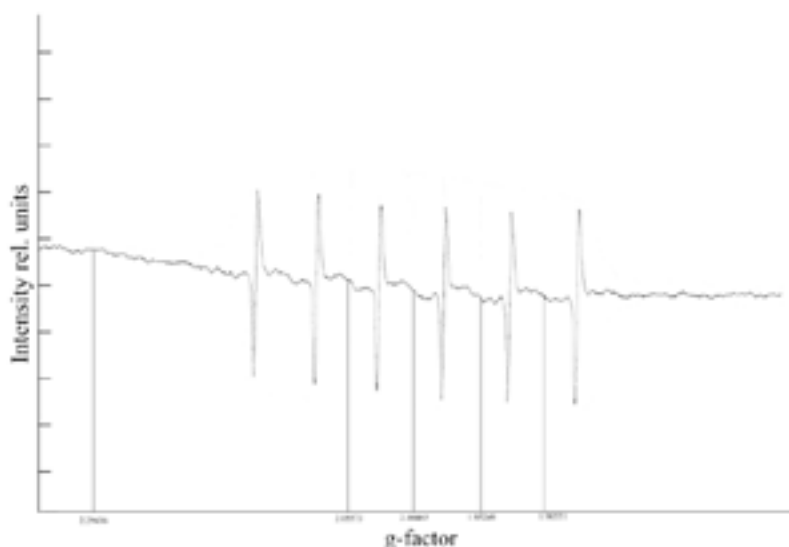


Рисунок 7 – Спектр ЭПР $\text{SiN}_{1,1}$ (800°C , 60 min, Ar) в развертке 50000 мТ

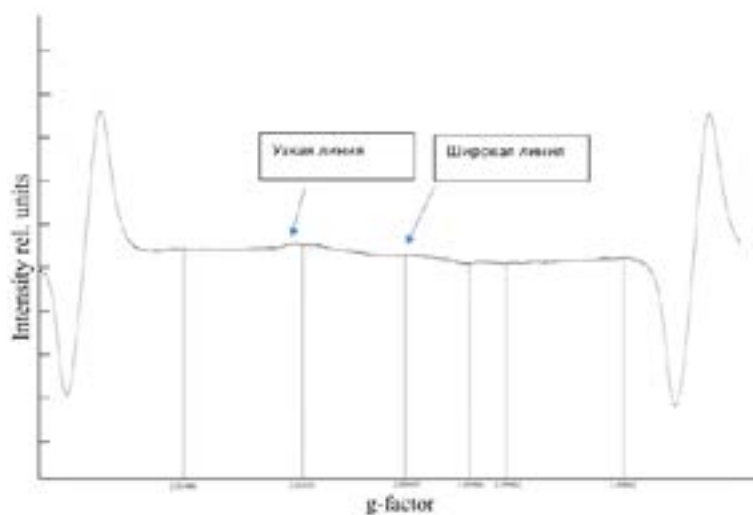


Рисунок 8 – Спектр ЭПР $\text{SiN}_{1,1}$ (800°C, 60 min, Ar) в развертке 5000 мТ

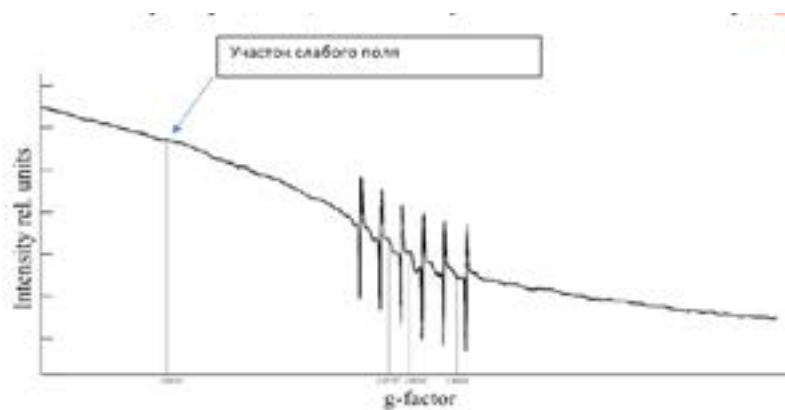


Рисунок 9 – Спектр ЭПР $\text{SiN}_{1,1}$ (1100°C, 60 min, Ar) в развертке 15000 мТ

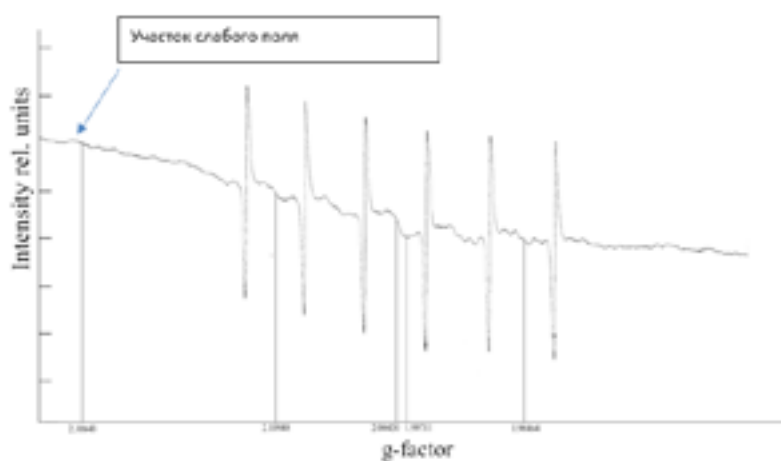


Рисунок 10 – Спектр ЭПР $\text{SiN}_{1,1}$ (1100°C, 60 min, Ar) при развертке 50000 мТ

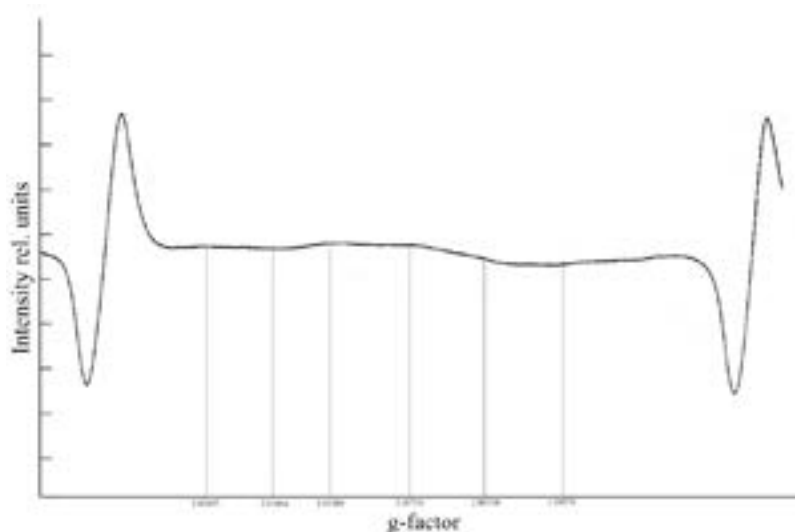


Рисунок 11 – Спектр ЭПР SiN_{1,1} (1100°C, 60 min, Ar) в развертке 5000 мТ

Выводы

Таким образом, установлено, что между третьей и четвертой компонентами марганца наблюдается сигнал от образца с g – фактором в области 2, что соответствует суперпозиции К и N излучательных центров. Он меняется в зависимости от температуры отжига. Кроме того, между остальными компонентами также наблюдаются сигналы ЭПР, что не является типичным для спектра марганца. Природа этих сигналов между остальными линиями марганца не установлена.

В зависимости от температуры отжига образца сигнал в слабых полях существенно уменьшается.

Благодарности

Данное исследование финансировалось по программе № AP09058002 «Исследование свойств динамической памяти на основе Si₃N₄/Si и формирование нанокластеров кремния с повышенной интенсивностью фотолюминесценции» Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан.

Литература

- 1 Parkhomenko I., Vlasukova L., Komarov F. et al. Origin of visible photoluminescence from Si-rich and N-rich silicon nitride films //Thin Solid Films. – 2017. – Vol.626. – P.70-75.
- 2 Gritsenko V.A., Meerson E.E., Travkov I.V., Goltvjanskii Yu.V. Nonstationary Electrons and Holes Transport by Depolarization of MNOS Structures: Experiment and Numerical Simulation //Microelectronics (Sov). – 1987. – Vol.16. – P.42-50.
- 3 Fujiwara I., Aozasa H., Nakamura A., Komatsu Y., Hayashi Y. 0.13 μm MONOS single transistor memory cell with separated source lines // Proc. IEDM. – 1998. – P.995-998.
- 4 Murzalinov D., Akilbekov A., Dauletbekova A., Vlasukova L., Makhavikov M., Zdorovets M. Structural transformation of Si-rich SiN_x film on Si via swift heavy ions irradiation //Materials research express. . – 2018. – Vol.3. – P.1-7.
- 5 Bratus V.Ya., Okulov S.M., Kaganovich E.B., Kizyak I.M., Manoilov E.G. ESR studies of nanocrystalline silicon films obtained by pulsed laser ablation of silicon targets //Physics and technology of semiconductors. – 2004. – Vol.5. – P.621-625.
- 6 Zakorzhevsky V. Silicon Nitride //Concise Encyclopedia of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2017. – P.339-341.
- 7 Ma K., Feng J. Y., Zhang Z. J. Improved photoluminescence of silicon nanosilicon nitride prepared by ammonia sputtering // Nanotechnology. – 2006. – Vol.17. – P.4650-4653.
- 8 Wang Y. Q., Kong G. L., Chen W. D., Diao H. W., Chen C. Y., Zhang S. B., Liao X. B. Getting high-efficiency photoluminescence from Si nanocrystals in SiO₂ matrix //Appl. Phys. Lett. – 2002. – Vol.81. – P.4174-4176.
- 9 Liu C., Li C., Ji A., Ma L., Wang Y., Cao Z. Intense blue photoluminescence from Si-in-SiN_x thin films with high-density nanoparticles //Nanotechnology. – 2005. – Vol.16. – P.940-943.

- 10 Kim T.Y., Park N.M., Kim K.H., Sung G.Y., Ok Y.W., Seong T.Y., Choi C.J. Quantum confinement effect of silicon nano-crystals in situ grown in silicon nitride films // *Appl. Phys. Lett.* – 2004. – Vol.85. – P.5355-5357.
- 11 Singh P., Ghosh S., Prakash G. V., Khan S. A., Kanjilal D., Srivastava A. K., Srivastava H., Srivastava P. Ion beam induced dissolution and precipitation of in situ formed Si-nanostructures in a-SiNx:H matrix // *Nucl. Instr. Meth.* – 2012. – Vol.276. – P.51-55.
- 12 Savchenko D., Poppl A., Kassiba A.H. CW and Pulse EPR Study of Paramagnetic Centers in Silicon Carbide Nanomaterials // *Frontiers in Magnetic Resonance.* – 2018. – P.225-242.
- 13 Cherkasov V.K., Kurskiy Yu.A., Kozhanov K.A., Bubnov M.P., Kuropatov V.A. EPR and NMR methods in organic and organoelement chemistry // *Electronic tutorial.* – 2010. – P.53.
- 14 Li H., Sun F., Dong T., Xu X. The Effect of Particle Size of Silicon Nitride Powder on Properties of Silicon Nitride Ceramic Balls // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering.* – 2019. – Vol.678. – P.1-6.
- 15 Caillahua M.C., Moura F., Solorzano G. Analytical Electron Microscopy of Silicon Nitride Nanostructures Synthesized from the Vapor Phase // *Journal of Nanotechnology.* – 2019. – Vol.3. – P.1-2.
- 16 Robertson J. Nature of the Si and N dangling bonds in silicon nitride // *Journal of Non-Crystalline Solids.* – 1995. – Vol.187. – P.297.
- 17 Desphande S.V., Gulari F., Brown S.W., Rand S.C. Optical properties of silicon nitride films deposited by hot filament chemical vapor deposition // *J. Appl. Phys.* – 1995. – Vol.77. – P.6534-6541.
- 18 Warren W.L., Robertson J., Kanicki J. Si and N dangling bond creation in silicon nitride thin films // *Appl. Phys. Lett.* – 1993. – Vol.63. – P.2685-2687.
- 19 Dobyichin N.A., Ivin M.N., Kachemtsev A.N., Karzanov V.V. Paramagnetic defects in Si₃N₄ exposed to neutron irradiation // *Collection of reports. Application of laser technologies for solving problems in physics of high energy densities. XX Kharitonov readings.* – 2018. – Vol.2. – P.174-176.
- 20 Brekhovskikh M.N., Solodovnikov S.P., Moiseeva L.M., Zhidkova I.A., Denisov G.L., Fedorov V.A. EPR spectra and distribution of manganese ions in modified fluorozirconate glasses // *Inorganic materials.* – 2019. – Vol.7. – P.756-759.
- 21 Xu Q., Li Y.X., Li X.N., Wang J.B., Yang F., Yang Y., Ren T.L. Simulation and experimental verification of silicon dioxide deposition by PECVD // *Modern physics letters B.* – 2017. – Vol.6. – P.1-16.
- 22 Huang H.B., Yue Z.H., He Y.P., Yuan J.R., Zeng X.X., Zhou N.G., Zhou L. Formation of Epitaxial Heavy-doped Silicon Films by PECVD Method // *Journal of wuhan university of technology-materials science edition.* – 2018. – Vol.3. – P.585-588.
- 23 El Arbi N., Jemai R., Khirouni K., Khemakhem H. The Variation of Crystalline Structure Induced by Gas Dilution and Thermal Annealing in Silicon Layers Deposited by PECVD Technique // *Silicon.* – 2019. – Vol.4. – P.2075-2086.
- 24 Jumaa K., Hadi S.A., Nayfeh A. Effect of PECVD a-Si Growth Temperature on the Performance of aSi/c-Si Solar Cells // *IEEE.* – 2019. – P.1909-1912.
- 25 Demidov E.S., Dobyichin N.A., Karzanov V.V., Marychev M.O., Sdobnyakov V.V. Electron paramagnetic resonance and photoluminescence in pyrolytic silicon nitride films under ion irradiation with argon and molecular nitrogen // *Semiconductor physics and technology.* – 2009. – Vol.7. – P.961-965.
- 26 Vorona I.P., Ishchenko S.S., Okulov S.M., Nosenko V.V. Some features of Mn²⁺ EPR spectra in cubic nano-ZnS // *Semiconductor physics quantum electronics & optoelectronics.* – 2020. – Vol.1. – P.60-65.

References

- 1 I. Parkhomenko, L. Vlasukova, F. Komarov and et al., *Thin Solid Films* 626, 70-75 (2017).
- 2 V.A. Gritsenko, E.E. Meerson, I.V. Travkov and Yu.V. Goltvjanskii, *Microelectronics (Sov)* 16, 42-50 (1987).
- 3 I. Fujiwara, H. Aozasa, A. Nakamura, Y. Komatsu, Y. Hayashi, *Proc. IEDM*, 995-998 (1998).
- 4 D. Murzalinov, A. Akilbekov, A. Dauletbekova, L. Vlasukova, M. Makhavikov and M. Zdorovets, *Materials research express* 3, 1-7 (2018).
- 5 V.Ya. Bratus, S.M. Okulov, E.B. Kaganovich, I.M. Kizyak, E.G. Manoilo, *Physics and technology of semiconductors* 5, 621-625 (2004). <https://doi.org/10.1134/1.1755899>.
- 6 V. Zakorzhevsky, *Concise Encyclopedia of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 339-341 (2017).
- 7 K. Ma, J. Y. Feng and Z. J. Zhang, *Nanotechnology* 14, 4650-4653 (2006).
- 8 Y.Q. Wang, G.L. Kong, W.D. Chen, H.W. Diao, C.Y. Chen, S.B. Zhang and X. B. Liao, *Appl. Phys. Lett.* 81, 4174-4176 (2002).
- 9 C. Liu, C. Li, A. Ji, L. Ma, Y. Wang and Z. Cao, *Nanotechnology* 16, 940-943 (2005).
- 10 T. Y. Kim, N. M. Park, K. H. Kim, G. Y. Sung, Y. W. Ok, T. Y. Seong and C. J. Choi, *Appl. Phys. Lett.* 85, 5355-5357 (2004).
- 11 P. Singh, S. Ghosh, G.V. Prakash, S.A. Khan, D. Kanjilal, A.K. Srivastava, H. Srivastava and P. Srivastava, *Nucl. Instr. Meth.* 276, 51-55 (2012).
- 12 D. Savchenko, A. Poppl and A.H. Kassiba, *Frontiers in Magnetic Resonance*, 225-242 (2018).
- 13 V.K. Cherkasov, Yu.A. Kurskiy, K.A. Kozhanov, M.P. Bubnov and V.A. Kuropatov, *Electronic tutorial*, 53, (2010).
- 14 H. Li, F. Sun, T. Dong and X. Xu, *IOP Conference Series Materials Science and Engineering* 678, 1-6 (2019).
- 15 M.C. Caillahua, F. Moura and G. Solorzano, *Journal of Nanotechnology* 3, 1-2 (2019).
- 16 J. Robertson, *Journal of Non-Crystalline Solids* 187, 297, (1995).
- 17 S.V. Desphande, F. Gulari, S.W. Brown and S.C. Rand, *J. Appl. Phys.* 77, 6534-6541 (1995).

- 18 W.L. Warren, J. Robertson and J. Kanicki, *Appl. Phys. Lett.* 63, 2685-2687 (1993).
- 19 N.A. Dobychin, M.N. Ivin, A.N. Kachemtsev and V.V. Karzanov, *Collection of reports. Application of laser technologies for solving problems in physics of high energy densities. XX Kharitonov readings 2*, 174-176, (2018).
- 20 M.N. Brekhovskikh, S.P. Solodovnikov, L.M. Moiseeva, I.A. Zhidkova, G.L. Denisov, V.A. Fedorov, *Inorganic materials* 7, 756-759 (2019).
- 21 Q. Xu, Y.X. Li, X.N. Li, J.B. Wang, F. Yang, Y. Yang and T.L. Ren, *Modern physics letters B* 6, 1-16 (2017).
- 22 H.B. Huang, Z.H. Yue, Y.P. He, J.R. Yuan, X.X. Zeng, N.G. Zhou and L. Zhou, *Journal of wuhan university of technology-materials science edition* 3, 585-588 (2018).
- 23 N. El Arbi, R. Jemai, K. Khirouni and H. Khemakhem, *Silicon* 4, 2075-2086 (2019).
- 24 K. Jumaa, S.A. Hadi, A. Nayfeh, *IEEE*, 1909-1912, (2019).
- 25 E.S. Demidov, N.A. Dobychin, V.V. Karzanov, M.O. Marychev and V.V. Sdobnyakov, *Semiconductor physics and technology* 7, 961-965 (2009).
- 26 I.P. Vorona, S.S. Ishchenko, S.M. Okulov and V.V. Nosenko, *Semiconductor physics quantum electronics & optoelectronics* 1, 60-65 (2020).