

8. Pawlik J. Development of Tunnel Diode Devices and Models for Circuit Design and Characterization//Dissertation for Doctor of Philosophy in Microsystems Engineering, Rochester Institute of Technology. 2007, -P.1-96.<https://scholarworks.rit.edu/theses>.

9. Demassa T. A., Knott D. P. The prediction of tunnel diode voltage-current characteristics//Solid State Electron. 1970, vol. 13, -P. 131-138.

10. Lotfi M., Zohir D.A Spice Behavioral Model of Tunnel Diode. // Simulation and Application. International Journal of Control and Automation. 2016, Vol. 9.

РЕЗЮМЕ. Nottva De-Massa nazariyasiga asosan tunnel diodining o'tish vaqtini diffuziya sig'imiga va tunnel diodidagi eng yuqori tok qiymatiga bog'liqligi hisoblangan. Shuningdek, tunnel diodida hosil bo'ladigan eng yuqori kuchlanish qiymatiga va eng past kuchlanish qiymati ham tunnel diodining o'tish vaqtiga ta'sir qilishi kuzatildi. Tunnel diodining o'tish vaqtini tunnel diodidagi eng yuqori tok qiymatini, eng quyinuqtadagi tok qiymatiga nisbatiga bog'liqlik nazariyusulda olindi va tajriba natijalariga moslik darajasi tekshirildi.

РЕЗЮМЕ. На основе теории Нотта и Де-Масса была рассчитана зависимость туннельного диода от диффузионной емкости и пикового тока в туннельном диоде. Кроме того, было замечено, что пиковое значение напряжения и минимальное значение напряжения, генерируемое в туннельном диоде, также влияют на время включения туннельного диода. Теоретически получена зависимость туннельного диода от времени включения туннельного диода по отношению пикового значения тока к значению тока в самой низкой точке туннельного диода и проверена степень согласия с экспериментальными результатами.

SUMMARY. Based on the Nott and De-Massa theory was calculated, the dependence of the tunnel diode on the diffusion capacitance and the peak current in the tunnel diode. In addition, it was observed that the peak voltage value and the minimum voltage value generated in the tunnel diode also affect the turn-on time of the tunnel diode. The dependence of the tunnel diode was checked on the turn-on time of the tunnel diode on the ratio of the peak current value to the current value at the lowest point in the tunnel diode was obtained theoretically and the degree of agreement with the experimental results.

ИЗМЕНЕНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ АТОМА ЭРБИЯ

М.Б.Шарибаев – кандидат физико-математических наук

Каракалпакский государственный университет имени Бердаха

Ш.К.Каландарова – докторант

Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза

Таянч сўзлар: эпитаксиал пленкалар, легирлаш, фотолюминесценция, интенсивлик.

Ключевые слова: эпитаксиальные пленки, легирование, фотолюминесценция, интенсивность.

Key words: epitaxial films, doping, photoluminescence, intensity.

Рост числа исследований кремния, легированного эрбием, связан с возможностью использования этого материала для создания кремниевых оптоэлектронных приборов на длине волны $1.54\mu\text{m}$ [1]. Одним из условий успешной реализации кремниевых приборных структур является достижение высокого содержания оптически активных центров, связанных с эрбием. При легировании кремния эрбием с помощью ионной имплантации используются ионы с высокой энергией (0.5–5MeV). Это приводит к образованию дефектов, которые сохраняются частично даже после продолжительного отжига и приводят к преципитации редкоземельной примеси [2]. При ионной имплантации, как и в иных методах легирования, в результате взаимодействия атомов эрбия и кремния формируются оптически неактивные силицидные соединения. Было установлено, что для подавления образования преципитатов эрбия и силицидов эрбия необходимо осуществлять процесс легирования при пониженных температурах и слои кремния со легированных кислородом для формирования оптически активных центров, включающих ионы Er^{3+} [3]. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) при со испарении кремния и эрбия удается выращивать слои с общей концентрацией эрбия вплоть до 10^{22}cm^{-3} [4]. Однако интенсивность фотолюминесценции в слоях с концентрацией эрбия, большей 10^{18}cm^{-3} , начинает ослабевать, что связано, вероятно, с образованием дефектов кристаллической структуры [4,5]. Другой метод, позволяющий выращивать

сильно легированные слои кремния, — твердофазная эпитаксия (ТФЭ). Процесс выращивания в нем осуществляется в две стадии: осаждение слоя при низких температурах, когда сегрегация примеси кинетически подавлена, и последующий отжиг пленки аморфного кремния [6]. Цель настоящей работы — исследование возможности выращивания сильно легированных эрбием слоев кремния методом ТФЭ, проявляющих фотолюминесценцию на длине волны $1.54\mu\text{m}$.

Выращивание легированных эрбием слоев кремния осуществлялось в сверхвысоковакуумной установке МЛЭ [7]. Испарение Si проводилось из сублимационного источника в виде прямоугольного бруска, разогреваемого прохождением тока, а испарение Er — также из сублимационного источника, вырезанного из металлической фольги. Подложкой служила прямоугольная пластина кремния, вырезанная по плоскости (100) или (111) из монокристаллического кремния марки КДБ-12. Она, как и источники, нагревалась пропусканием тока. После отжига подложки при $T=1250^\circ\text{C}$ в течение 10 min проводилось выращивание слоев кремния либо методом МЛЭ при температуре подложки 500°C , либо методом ТФЭ на нагретую подложку с последующим отжигом *in situ*. Спектры ФЛ структур измерялись при температуре 77 K с помощью Фурье-спектрометра BOMEM DA3 с разрешением 1cm^{-1} при накачке излучением Ar^+ лазера (с длиной волны $\lambda=514.5\text{nm}$) мощностью 80 mW со стороны эпитаксиального слоя. Структура слоев исследовалась методом электронографии. Спектр

фотолюминесценции от этой структуры, измеренный при температуре жидкого азота, приведен на рис. 1. Широкая полоса с максимумом при 6500 cm^{-1} характерна для ФЛ иона Er^{3+} в структурах Si:Er/Si , полученных методом сублимационной МЛЭ с металлическим источником эрбия и содержащих более высокую (по сравнению с содержанием эрбия) концентрацию кислорода и углерода.

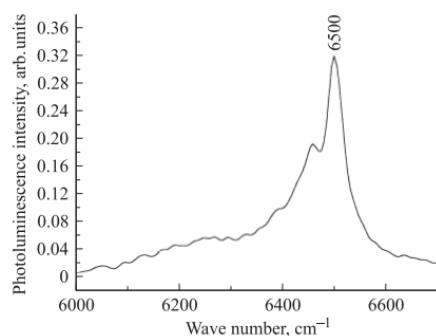


Рис.1. Спектр ФЛ структуры, выращенной в процессе МЛЭ. Спектр записан при $T=77\text{ K}$ и мощности накачки аргонового лазера $P=80\text{ mW}$.

Спектр фотолюминесценции эрбия в эпитаксиальном слое кремния, выращенном в режиме ТФЭ, приведен на рис.2. Спектр содержит интенсивную серию узких линий люминесценции, относящихся к переходу $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ в 4f-оболочке иона Er^{3+} в известном изолированном излучающем центре с кубической симметрией [8]. Обычно такой спектр характерен для эрбия в монокристаллическом кремнии при малом (по сравнению с концентрацией эрбия) содержании кислорода. Вместе с тем интегральная интенсивность люминесценции иона Er^{3+} в структуре, полученной в режиме ТФЭ, в 2 раза превышает таковую в структуре, выращенной в процессе МЛЭ.

Согласно существующим представлениям о механизме ТФЭ слоев аморфного кремния, напыленных в вакууме на монокристаллическую подложку, при отжиге происходит движение фронта эпитаксиальной кристаллизации от границы раздела монокристалл/аморфная пленка к поверхности слоя [9].

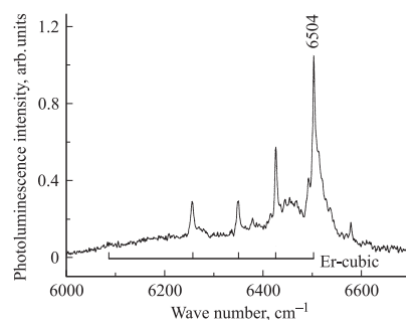


Рис.2. Спектр ФЛ структуры, выращенной в режиме ТФЭ. Условия регистрации ФЛ такие же, как для спектра на рис. 1.

Если при температуре отжига 600°C кристаллизация аморфного кремния на монокристаллической подложке происходит за счет эпитаксиального упорядочения атомов аморфной фазы вблизи границы раздела монокристалл/аморфная пленка, то при 800°C происходит дополнительно зарождение и рост случайно ориентированных кристаллитов в объеме аморфного кремния. Скорость эпитаксиальной кристаллизации при 80° составляет $2.2\text{--}10\text{ nm/min}$. Такая высокая скорость кристаллизации приводит к тому, что в конце отжига часть поверхности оказывается занятой монокристаллической фазой, а часть – поликристаллической. О влиянии кислорода на замедление скорости кристаллизации сообщалось в [10]. Однако при напуске кислорода в наших опытах в моменты приостановки процесса роста, вероятно, образуется незначительный по толщине слой адсорбированного газа, который, может быть, лишь частично захватывается растущим слоем. В результате общее количество введенного в слой кислорода незначительно. Это, по-видимому, и вызывает наблюдаемые изменения спектра фотолюминесценции ионов Er^{3+} в слоях кремния, выращенных методом ТФЭ. Таким образом, метод твердофазной эпитаксии позволяет в напыленной в сверхвысоком вакууме пленке кремния сформировать сильнолегированный эрбием слой, от которого наблюдается более интенсивная фотолюминесценция, чем от слоя, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Литература

1. Н.А. Соболев. ФТП29, 1153 (1995).
2. A.Polman.J.Appl.Phys.82,1(1997).
3. Y.Ho Xie, E.A. Fitzgerald, Y.J. Mii. J. Appl. Phys.70, 1153 (1991).
4. H. Efeoglu, J.H. Evans, T.E. Jackmann et al. Semicond. Sci. Technol.8, 236 (1993).
5. R. Serna, M. Lohmeier et al. Appl. Phys. Lett.66, 1385 (1995).
6. V.G. Zavodskii, A.V. Zotov. Phys. Stat. Sol.(a). 72, 391 (1982).
7. С.П. Светлов, В.Ю. Чалков, В.Г. Шенгуров. ПТЭ4, 141 (2000).
8. H. Przybylinska et al. Phys. Rev. B54, 2532 (2017).
9. I.G. Kaverina, V.V. Korobtsov, V.G. Lifshits. Thin Solid Films 177, 101 (2020).
10. C.W. Noguee, J.C. Bean, C. Foti, J.M. Poate. Thin Solid Films 81,1(2021).

РЕЗЮМЕ. Мақолада икки хил ўсиш режимидан фойдаланган ҳолда эрбий билан қўшилган кремнийнинг эпитаксиал қатламлари натижалари келтирилган: анъанавий молекуляр нур эпитаксиси (МНЭ) ва каттик фаза эпитаксиси (КТЭ). Эрбий қўшилган кремний қатлами КТЭ томонидан совук субстратга ётқизилганида ва тавлангандан сўнг, $1,54\text{ мкм}$ тўлқин узунлигида кучлироқ фотолуминесанс тасмаси намоён бўлиши кўрсатилган.

РЕЗЮМЕ. В статье приведены результаты выращивания эпитаксиальных слоев кремния, легированных эрбием, с использованием двух разных режимов роста: обычной молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и твердофазной эпитаксии (ТФЭ). Показано, что легированный эрбием слой кремния при его осаждении методом ТФЭ на холодную подложку и после отжига проявляется более интенсивную полосу фотолюминесценции на длине волны 1.54 мкм .

SUMMARY. The article states that in the results of growing erbium-doped epitaxial silicon layers using two different growth modes: conventional molecular beam epitaxy (MBE) and solid-phase epitaxy (SPE) are presented. It has been shown that an erbium-doped silicon layer, when deposited by SPE on a cold substrate and after annealing, exhibits a more intense photoluminescence band at a wavelength of 1.54 мкм .