

05;06;07

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ЭРБИЕМ

© В.П.Бондаренко, Н.Н.Ворозов, Л.Н.Долгий,
А.М.Дорофеев, Н.М.Казючич, А.А.Лешок, Г.Н.Троянова

Легирование кремния эрбием — перспективное направление оптоэлектроники, поскольку структуры Si:Er излучают свет с длиной волны 1.54 мкм, соответствующей минимуму потерь и дисперсии кварцевой волоконной оптики [1]. Формирование поверхностного слоя пористого кремния (ПК) позволяет существенно упростить процесс легирования кремния эрбием. Ранее установлено, что ПК с пористостью 60–80%, легированный эрбием, люминесцирует в видимой области спектра и эффективно излучает свет с длиной волны 1.54 мкм [2–5]. Однако высокопористые структуры имеют низкую механическую прочность, высокое электрическое сопротивление и нестабильные физико-химические свойства [6].

В настоящей работе впервые показана возможность интенсивной 1.54 мкм люминесценции в слоях плотного ПК с различной структурой, сформированного на монокристаллах кремния электронного и дырочного типов проводимости.

В качестве исходных образцов использовали кремниевые монокристаллы p - и n^+ -типа, легированные бором и сурьмой до концентрации $8 \cdot 10^{16}$ и $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Слои пористого кремния толщиной 1–20 мкм формировали анодированием в 12–48% HF при плотности тока 2–40 мА/см². Катодное осаждение эрбия проводили из спиртового раствора $\text{Er}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ при плотности тока 125 мкА/см² в течение 30 мин. Затем образцы подвергали термообработке при 800–1200°C на воздухе галогенными лампами в течение 30 с или в диффузионной печи 2–10 мин. В этих же режимах изготавливали контрольные образцы монокристаллического кремния с электрохимически осажденным эрбием. Для возбуждения люминесценции использовали Ag лазер ($\lambda_{\text{exc}} = 488 \text{ нм}$). Спектры излучения регистрировали при 77 и 300 К решеточным монохроматором МДР-23 с Ge:Cu фотоприемником, охлаждаемым жидким азотом.

В спектре люминесценции ПК p -типа зафиксированы две широкие полосы с максимумами 1.3 и 0.85 мкм. В образцах ПК n^+ -типа люминесценция отсутствовала. Электрохими-

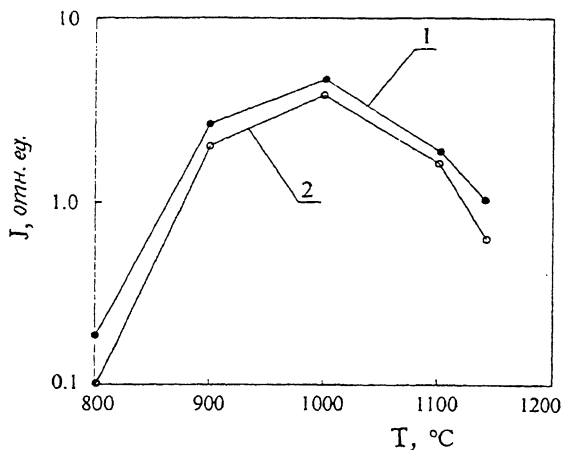


Рис. 1. Зависимость интенсивности 1.54 мкм фотолюминесценции пористого кремния *p*-типа, легированного эрбием, от температуры активации эрбия. Толщина слоя пористого кремния 5 мкм. Температура измерений: 1 — 77 К; 2 — 300 К.

ческое осаждение эрбия практически не влияло на спектры люминесценции пористого кремния.

После высокотемпературного (800–1200°C) отжига на всех образцах ПК, легированных эрбием, был зарегистрирован дополнительный узкий пик люминесценции с характерной для эрбия длиной волны 1.54 мкм. В контрольных образцах без ПК с электрохимически осажденным Er такая люминесценция отсутствовала. Интенсивность 1.54 мкм люминесценции слоев пористого кремния на *n*⁺-кремнии была существенно ниже по сравнению с ПК на *p*-кремнии. Такое различие может быть связано как с различной структурой пористых материалов *p*- и *n*⁺-типов [7], так и с наличием в спектре ПК *p*-типа излучения с длиной волны, меньшей 1.54 мкм, обеспечивающего дополнительное возбуждение эрбия.

Интенсивность излучения, связанного с оптически активным Er, зависела от температуры термообработки. Для ПК *p*-типа увеличение температуры отжига до 1000°C сопровождалось ростом интенсивности 1.54 мкм пика (рис. 1). По-видимому, это связано с увеличением степени окисления поверхности пор и соответственно с повышением степени оптической активации ионов эрбия, необходимым условием которой является образование комплексов иона Er³⁺ с 6 атомами кислорода [8]. Дальнейший рост температуры приводил к уменьшению интенсивности люминесценции эрбия (рис. 1), что может быть связано с диссоциацией при-

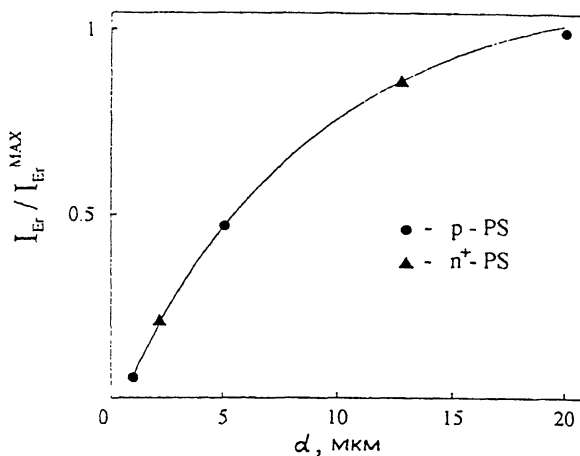


Рис. 2. Зависимость интенсивности 1.54 мкм фотолюминесценции от толщины слоя пористого кремния p -типа d , легированного эрбием. Оптическая активация эрбия галогенными лампами: температура — 1000°C ; длительность — 30 с, среда — воздух.

местных комплексов “эрбий-кислород” и/или образованием в кремниевом остове пористого слоя кристаллографических дефектов, увеличивающих вероятность безызлучательной рекомбинации [1]. Для более плотного пористого материала n^+ -типа требовалась более высокая, до 1200°C , температура и длительность отжига 5–10 мин для появления люминесценции на длине волны 1.54 мкм.

Увеличение толщины слоя ПК при неизменных условиях осаждения эрбия сопровождалось ростом интенсивности 1.54 мкм люминесценции (рис. 2). При постоянных длительности осаждения и плотности катодного тока количество введенного эрбия должно быть одинаковым. Рост интенсивности 1.54 мкм излучения, таким образом, свидетельствует об увеличении доли оптически активного Er с увеличением толщины ПК. Это косвенным образом подтверждает, что осаждение металла происходит преимущественно на стенки пор, а не на поверхность образца.

Следует особо отметить тот факт, что интенсивность Er пика практически не изменялась при увеличении температуры измерения с 77 К до комнатной, в отличие от легированного эрбием монокристаллического кремния, для которого характерно резкое, на несколько порядков, падение интенсивности 1.54 мкм люминесценции [1]. Сопоставительный анализ [2] различных полупроводников, легированных эрбием, показал, что с ростом ширины запрещенной зоны полупроводника от 0.807 эВ (для GaInAsP) до 2.42 эВ (для

CdS) наблюдается ослабление температурного гашения E_g излучения. Наблюдаемая экспериментально (рис. 1) слабая температурная зависимость интенсивности 1.54 мкм излучения может свидетельствовать о том, что ион Eg^{+3} находится в материале с увеличенной, по сравнению с исходным кремниевым монокристаллом, шириной запрещенной зоны. Этим материалом могут быть как кремниевые нанокристаллиты с модифицированной вследствие квантово-размерного эффекта зонной структурой, так и аморфный слой на их поверхности.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты показывают, что для формирования светоизлучающих структур можно использовать низкопористые материалы как губчатого типа на кремнии p -типа, так и пористый кремний с древовидной структурой на кремнии n^+ -типа. Последний широко используется для геттерирования дефектов и формирования изолирующих областей и структур "кремний-на-изоляторе", а также в качестве буферного слоя в гомо- и гетероэпитаксиальных структурах [9]. Легирование такого материала эрбием позволяет расширить диапазон приборных структур. В частности, введение эрбия в интегральные оптические волноводы на основе пористого кремния [10] может быть использовано для устройств фильтрации, усиления и генерации оптических сигналов.

Список литературы

- [1] *Соболев Н.А.* // ФТП. 1995. Т. 29. В. 7. С. 1153–1177.
- [2] *Namavar F., Lu F., Perry C.H. et al.* // MRS Symp. Proc. 1995. V. 358. P. 375–380.
- [3] *Shin J.H., Hoven G.N., Polman A.* // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. P. 2379–2381.
- [4] *Kimura T., Yokoi A., Horiguchi H. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. P. 983–985.
- [5] *Dorofeev A.M., Gaponenko N.V., Bondarenko V.P. et al.* // J. Appl. Phys. 1995. V. 77. P. 2679–2783.
- [6] *Bziesy A., Vial J.C., Gaspard F. et al.* // Surf. Sci. 1991. V. 254. P. 195–200.
- [7] *Smith R.L., Collins S.D.* // J. Appl. Phys. 1992. V. 71. P. R1–R22.
- [8] *Adler D.L., Jacobson D.C., Eaglesham D.J.* // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 61. P. 2181–2183.
- [9] *Бондаренко В.П., Брисенко В.Е., Глиненко Л.Н., Райко В.А.* // За рубежом электронная техника. 1989. В. 9. С. 55–84.
- [10] *Бондаренко В.П., Дорофеев А.М., Казючиц Н.М. и др.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 14. С. 73–76.

Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники
Минск

Поступило в Редакцию
15 августа 1996 г.