

©1994 г.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОТЖИГА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В Si:Er

Н.А.Соболев, М.С.Бреслер, О.Б.Гусев, М.И.Макавиччук,
Е.О.Паршин,* Е.И.Шек*

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия

* Институт микроэлектроники Российской академии наук,
150007, Ярославль, Россия

(Получена 29 апреля 1994 г. Принята к печати 10 мая 1994 г.)

Исследовано влияние температуры, времени и атмосферы, в которой производился отжиг образцов Si:Er на интенсивность фотолюминесценции на длине волны 1.54 мкм. Ионы эрбия с энергией 1 МэВ имплантировались в Si *p*-типа проводимости. Доза облучения составляла 10^{13} см⁻². Установлено, что интенсивность фотолюминесценции в зависимости от атмосферы отжига увеличивается в последовательности: кислород, аргон, хлорсодержащая атмосфера. Определены оптимальные условия отжига образцов Si:Er в хлорсодержащей атмосфере. Выявлена существенная роль собственных точечных дефектов в образовании оптически активных центров.

Введение

Создание кремниевых оптоэлектронных приборов несомненно является актуальнейшей задачей современных физики и техники полупроводников. Один из путей решения этой задачи состоит в получении кремния, легированного эрбием, Si:Er, излучающего на длине волны 1.54 мкм, соответствующей минимуму поглощения в линиях волоконно-оптической связи. Фото- и электролюминесценция (ФЛ и ЭЛ) наблюдались в образцах Si:Er, полученных методами ионной имплантации [1-3], молекулярно-лучевой эпитаксии [4,5], твердофазной эпитаксии [6,7] и диффузии [8]. Наилучшие результаты, заключающиеся в создании Si:Er, в котором ФЛ и ЭЛ проявлялись при комнатной температуре, были получены при использовании имплантационной технологии.

Одна из стадий создания светоизлучающего Si:Er — это постимплантационный отжиг, цель которого заключается в устранении имплантационных дефектов и активации оптических центров Er. Иссле-

дования влияния отжига проводились в широких диапазонах температур и времени в различных средах: смеси аргона с водородом, вакууме, аргоне, азоте и кислороде [1-8].

В настоящее время определены оптимальные (с точки зрения максимальной интенсивности люминесценции) температура и время отжига, которые равны 900 °С и 30 мин соответственно. Сравнение же различных атмосфер отжига, насколько нам известно, не проводилось. Более того, вообще не исследовалась эффективность использования для этих целей хлорсодержащей атмосферы (ХСА), применение которой позволило существенно улучшить качество нейтронно-легированного кремния и параметры мощных высоковольтных приборов [9,10]. Цель данной работы заключалась в определении условий постимплантационного отжига, обеспечивающих максимальные значения интенсивности ФЛ.

Экспериментальные условия

Ионы эрбия имплантировались в полированные пластины Si, выращенного методом Чохральского (Cz-Si) с ориентацией (100), *p*-типа проводимости и удельным сопротивлением ≈ 10 Ом·см. Имплантация проводилась на установке High Voltage Engineering Europe 500. Энергия ионов равнялась 1 МэВ. Доза облучения составляла 10^{13} см⁻². Температура кремниевой пластины в процессе облучения не превышала 60 °С. Отжиг образцов Si:Er проводился в диапазоне температур (700–1100) °С в течение (15–240) мин в одной из трех газовых сред: кислород, аргон, ХСА. ХСА представляла собой поток кислорода, содержащий пары четыреххлористого углерода с молярной концентрацией (0.25–1) %.

ФЛ возбуждалась аргоновым лазером с длиной волны 514.5 нм. Излучение лазера направлялось на образцы, находившиеся в жидком гелии при $T=1.8$ К. Спектры ФЛ регистрировались двойным решеточным спектрометром ДФС-12 с фокусным расстоянием 822 мм по схеме синхронного детектирования. В качестве фотоприемника использовался германиевый фотодиод.

Результаты и обсуждение

На рис. 1,а приведен спектр ФЛ одного из исследованных образцов. Наиболее интенсивная линия наблюдается на длине волны 1.54 мкм и соответствует электронному переходу с наинизшего уровня первого возбужденного состояния $^4I_{13/2}$ на наинизший уровень основного состояния $^4I_{15/2}$. В спектре ФЛ наблюдались также еще три линии с меньшей интенсивностью, возникающие благодаря электронным переходам с наинизшего возбужденного состояния на другие уровни основного состояния. Положение линий на рис. 1,а совпадает с данными, приведенными Тангом с соавт. [11] для межузельного кубического эрбиевого центра. Однако, на наш взгляд, вопрос о симметрии и структуре светоизлучающего центра остается открытым. В дальнейшем мы исследовали влияние условий отжига образцов Si:Er на интенсивность основной линии ФЛ (1.54 мкм).

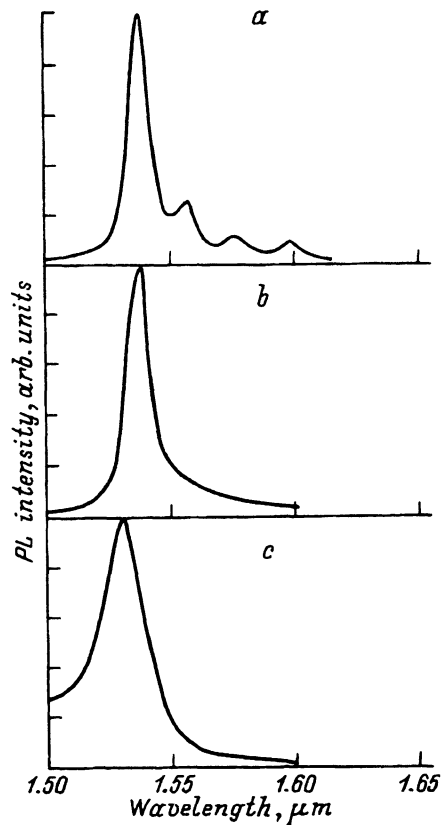


Рис. 1. Спектры ФЛ образцов, термообработанных при различных температурах в течение 30 мин в ХСА, содержащей 0.5% четыреххлористого углерода. Температура отжига, °С: *a* — 900, *b* — 700, *c* — 1100.

Атмосфера постимплантационного отжига может служить источником неконтролируемых примесей, попадающих в образцы из окружающей технологической оснастки, и неравновесных собственных точечных решеточных дефектов (вакансий и межузельных атомов кремния), возникающих в приповерхностном слое в результате квазихимических реакций. Атмосфера отжига может также выступать в качестве геттера неконтролируемых примесей и структурных дефектов.

ХСА обладает наибольшими возможностями по сравнению с другими средами, так как она в процессе отжига не только предотвращает загрязнение образцов неконтролируемыми примесями и эффективно геттерирует имеющиеся дефекты, но и позволяет управлять поведением неравновесных собственных дефектов, которые на современном уровне развития кремниевой технологии играют определяющую роль при образовании или подавлении дефектов [9,10,12].

Для сравнения влияния атмосферы отжига на интенсивность ФЛ отжиг проводился при 900 °С в течение 30 мин, так как в опубликованных работах [12,13] было показано, что эти условия являются оптимальными. На рис. 2 приведена зависимость интенсивности ФЛ от атмосферы отжига. Как видно из рисунка, интенсивность ФЛ увеличивается в ряду кислород-аргон-ХСА. Снижение интенсивности ФЛ при отжиге в кислороде по сравнению с ХСА, по-видимому, обусловлено пересыщением кремния собственными межузельными атомами. При

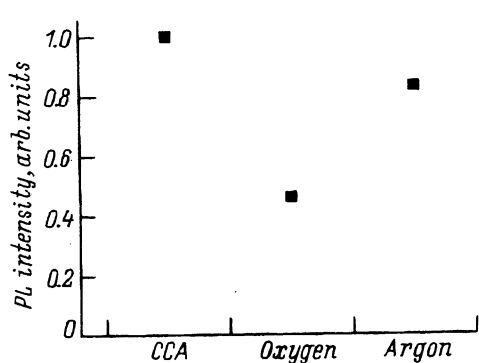


Рис. 2. Зависимость интенсивности ФЛ от типа атмосферы отжига при 900°C в течение 30 мин.

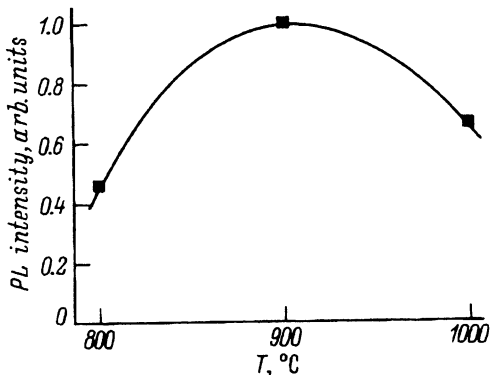


Рис. 3. Зависимость интенсивности ФЛ от температуры отжига в течение 30 мин в ХСА, содержащей 0.5% четыреххлористого углерода.

этом уменьшение интенсивности ФЛ может быть связано с двумя причинами, во-первых, с уменьшением концентрации оптически активных центров, так как ионы эрбия, окруженные атомами кремния, не излучают [14], во-вторых, с образованием рекомбинационно-генерационных центров, сформированных с участием собственных межузельных атомов и являющихся эффективным каналом безызлучательной рекомбинации [12].

Небольшие значения интенсивности ФЛ при отжиге в аргоне по сравнению с ХСА можно объяснить генерацией неравновесных вакансий [12]. Пересыщение кремния вакансиями, с одной стороны, может изменять структуру эрбиевого центра, например перевести Ег из межузельного положения в узельное, тем самым уменьшая концентрацию оптически активных центров. С другой стороны, возможно образование вакансионных центров в запрещенной зоне кремния, которые также могут увеличивать скорость безызлучательной рекомбинации [12]. Конечно, не следует исключать возможность загрязнения образцов Si:Ег неконтролируемыми примесями при отжиге в кислороде или аргоне.

При исследовании влияния температуры отжига в ХСА на интенсивность ФЛ образцы Si:Ег отжигались в течение 30 мин. Экспериментальные результаты приведены на рис. 3. Наблюдаемая нами зависимость аналогична зависимости, приведенной Михелем с соавт. в работе [2] для образцов Cz-Si при имплантации ионов Ег с энергией 5.25 МэВ и термообработке в вакууме в течение 30 мин. Появление максимума на зависимости интенсивности ФЛ от температуры отжига авторы [13] объяснили следующим образом. При низких температурах отжига свет излучают комплексы, в состав которых входят ионы Ег и собственные точечные дефекты, образовавшиеся в результате ионной имплантации. При увеличении температуры отжига имплантационные дефекты отжигаются, но образуются новые комплексы, в состав которых кроме ионов Ег входят другие примеси, например кислород или углерод, содержащиеся в Cz-Si в достаточно большой концентрации. Эти комплексы характеризуются большей оптической активностью. Максимальная интенсивность ФЛ наблюдается после отжига при 900°C . При больших температурах отжига концентрация оптически

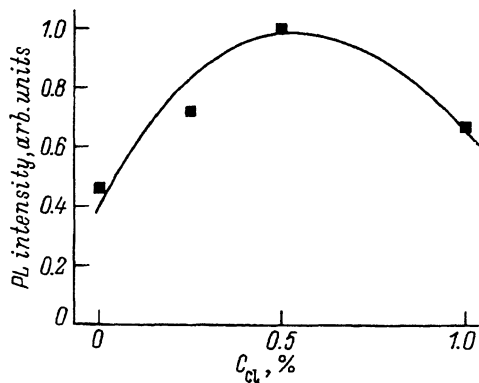


Рис. 4. Зависимость интенсивности флуоресценции от концентрации четыреххлористого углерода C_{Cl_4} газовой смеси в процессе отжига при $900^\circ C$ в течение 30 мин.

ски активных ионов E_g уменьшается из-за диссоциации примесных комплексов, содержащих E_g , или увеличения их размеров.

На рис. 1 приведены также спектры флуоресценции после отжига $Si:E_g$ при $700^\circ C$ (рис. 1, b) и $1100^\circ C$ (рис. 1, c). Интенсивность флуоресценции после отжига при 700 и $900^\circ C$ практически совпадают, а интенсивность после отжига при $1100^\circ C$ в 1.7 раза выше, чем интенсивность для $900^\circ C$. В то же время в спектрах на рис. 1, b, c наблюдается только один пик, что косвенно подтверждает объяснение зависимости интенсивности флуоресценции от температуры отжига, предложенное в работе [13].

При исследовании влияния концентрации хлорсодержащего компонента в газовой смеси на интенсивность флуоресценции образцы $Si:E_g$ отжигались при температуре $900^\circ C$ в течение 30 мин. Экспериментальные результаты приведены на рис. 4. Максимальное значение сигнала флуоресценции достигается при концентрации четыреххлористого углерода 0.5%. Скорее всего, такая концентрация хлорсодержащего компонента во время отжига позволяет практически предотвратить пересыщение кремния неравновесными собственными дефектами. Уменьшение концентрации ниже оптимального значения приводит к пересыщению кремния собственными межузельными атомами, а увеличение концентрации — к пересыщению вакансиями. В этих случаях уменьшение интенсивности флуоресценции связано с теми же причинами, что и при отжиге в кислороде и аргоне соответственно. Уменьшение интенсивности флуоресценции при концентрациях, выше оптимальной, является доказательством того, что действие ХСА во время отжига связано не только с быстро диффундирующими примесными атомами (предотвращением их проникновения или их выведением из $Si:E_g$ во время отжига), но и с собственными точечными дефектами (их генерацией и взаимодействием между собой, с примесными атомами и другими структурными дефектами).

Таким образом, показана возможность использования отжига в ХСА для улучшения люминесцентных свойств $Si:E_g$, полученного ионной имплантацией. Продемонстрировано участие неравновесных собственных точечных дефектов в образовании оптически активных центров E_g .

Авторы благодарны И. Н. Ясевич, привлекая их внимание к проблеме $Si:E_g$.

Список литературы

- [1] H. Ennen, J. Schneider, G. Pomrenke, A. Axmann. Appl. Phys. Lett., **43**, 943 (1983).
- [2] J. Michel, J.L. Benton, R.F. Ferraute, D.C. Jacobson, D.J. Eaglesham, E.A. Fitzgerald, Y.-H. Xie, J.M. Poate, L.C. Kimerling. J. Appl. Phys., **70**, 2672 (1991).
- [3] F.Y.G. Ren, J. Michel, Q. Sun-Paduano, B. Zheng, H. Kitagawa, D.C. Jacobson, J.M. Poate, L.C. Kimerling. MRS Symposia Proc., **301**, 87 (1993).
- [4] H. Ennen, G. Pomrenke, A. Axmann, K. Eisele, W. Haudl, J. Schneider. Appl. Phys. Lett., **46**, 381 (1985).
- [5] H. Efeoglu, J.H. Evans, T.E. Jackman, B. Hamilton, D.C. Houghton, J.M. Langer, A.R. Peaker, D. Perovic, I. Poole, N. Ravel, P. Hemment, C.W. Chen. Semicond. Sci. Techn., **8**, 236 (1993).
- [6] A. Polman, J.C.S. Custer, E. Snoeks, G.N. van den Hoven. Appl. Phys. Lett., **62**, 507 (1993).
- [7] S. Coffa, F. Priolo, G. Franzo, V. Bellamy, A. Carnera, C. Spinella. MRS Symposia Proc., **301**, 125 (1993).
- [8] N.A. Sobolev, O.V. Alexandrov, B.N. Gresserov, G.M. Gusinskii, V.O. Naidenov, E.I. Sheck, V.I. Stepanov, Yu.V. Vyzhigin, L.F. Chepik, E.P. Troshina. Sol. St. Phenomena, **32-33**, 83 (1993).
- [9] A.T. Kurbakov, N.A. Sobolev. Mater. Sci. Eng. B, **22**, 149 (1994).
- [10] N.A. Sobolev, Yu.V. Vyzhigin, B.N. Gresserov, E.I. Sheck, A.I. Kurbakov, E.E. Rubinova, V.A. Trunov. Sol. St. Phenomena, **19-20**, 169 (1991).
- [11] Y.S. Yang, K.C. Heasman, W.P. Gillin, B.J. Sealy. Appl. Phys. Lett., **55**, 432 (1989).
- [12] Ю.В. Выжигин, Н.А. Соболев, Б.Н. Грессеров, Е.И. Шек. ФТП, **26**, 1938 (1992).
- [13] J. Michel, F.Y.G. Ren, B. Zheng, D.C. Jacobson, J.M. Poate, L.C. Kimerling. Mater. Sci. Forum, **143-147**, 707 (1994).
- [14] D.A. Adler, D.C. Jacobson, D.J. Eaglesham, M.A. Marcus, J.L. Benton, J.M. Poate, P.H. Citrin. Appl. Phys. Lett., **61**, 2181 (1992).

Редактор Т.А. Полянская
