

©1994 г.

МЕЛКИЕ АКЦЕПТОРНЫЕ ЦЕНТРЫ, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ ПРИ ДИФФУЗИИ ЭРБИЯ В КРЕМНИЙ

*О.В.Александров**, *В.В.Емцев*, *Д.С.Полоскин*, *Н.А.Соболев*, *Е.И.Шек*

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

* АОЗТ «Светлана-полупроводник», Санкт-Петербург, Россия
(Получена 27 июня 1994 г. Принята к печати 28 июня 1994 г.)

Показано, что диффузия Er в Si при высоких температурах (1100–1250 °C) приводит к образованию мелких акцепторных центров с энергией $E_v + 45$ мэВ. Концентрация этих центров зависит от условий термообработки и, в частности, от типа и концентрации избыточных собственных точечных дефектов, участвующих в процессах диффузии. Пересыщение вакансиями Si сопровождается значительным увеличением концентрации акцепторных центров. Пересыщение собственными межузельными атомами Si уменьшает их концентрацию. Полученные результаты позволяют предположить, что эти центры сформированы примесными атомами эрбия в положении замещения.

Введение

Легирование кремния редкоземельными элементами привлекает все большее внимание благодаря возможности использования такого материала в оптоэлектронных приборах. Наибольший интерес вызывает Si(Er), поскольку редкоземельные ионы Er приводят к возникновению в спектре люминесценции узкой температурно-независимой линии с длиной волны 1.54 мкм, соответствующей минимуму дисперсии и минимуму потерь в системах волоконно-оптических линий связи. Недавно на основе Si(Er) были получены светодиоды, излучающие при комнатной температуре [1]. Однако интенсивность люминесценции в таких приборах еще низка для практического использования. Поэтому необходимо проведение систематического исследования свойств Si(Er) и, в частности, изучение электрически активных центров, возникающих в процессе легирования.

После ионной имплантации примеси Er в Si и последующего отжига в [2] наблюдалось образование девяти дискретных донорных центров, образование которых авторы связали с введением эрбия. Они считали, что данные центры могут быть образованы как межузельными атомами эрбия, так и комплексами (или кластерами), содержащими

этот редкоземельный элемент. В то же время в литературе имеются сведения о n - p -конверсии типа проводимости кремния в результате диффузии эрбия при высоких температурах [3-5]. Однако параметры образующихся акцепторных центров, возникающих при диффузии примеси эрбия, до сих пор не были определены.

Цель настоящей работы заключалась в детальном изучении электрически активных центров, образующихся в кремнии при диффузии Er.

Экспериментальные условия

В качестве исходного материала использовались бездислокационные кристаллы кремния n - и p -типа проводимости с удельным сопротивлением 1-20 Ом·см, выращенные по методу Чохрального. Источником Er служили пленки на основе тетраэтоксисилана, содержащего хлорид эрбия. Диффузия и последующий отжиг проводились при температурах 1100-1250 °C в течение 0.25-30 ч в газовых потоках аргона или кислорода.

Концентрационные профили примеси измерялись методом дифференциальной проводимости. Значения подвижности дырок были взяты из работы [6]. Тип проводимости определялся с помощью термозонда. Измерение эффекта Холла проводилось в интервале температур 10-300 К. Для этих измерений поверхностные слои Si удалялись до глубины, на которой концентрация электрически активных центров составляла $4 \cdot 10^{16}$ - $1 \cdot 10^{17}$ см⁻³.

Результаты и обсуждение

Диффузия примеси эрбия сопровождается образованием акцепторных центров в приповерхностном слое кремния, причем в случае n -Si наблюдалась n - p -конверсия типа проводимости. Отжиг в аналогичных условиях кремниевых пластин с нанесенными на поверхность пленками, не содержащими эрбия, не сопровождался образованием акцепторных центров. Если диффузия Er проводилась в атмосфере аргона, то концентрация акцепторных центров N в Si была существенно выше, чем в пластинах после диффузии Er в атмосфере кислорода. Типичные концентрационные профили после диффузии в различных средах приведены на рис. 1. Разница в поверхностных концентрациях акцепторов при одинаковых температурно-временных условиях диффузии может составлять 2 порядка величины. Максимальная поверхностная концентрация этих центров достигала $3 \cdot 10^{18}$ см⁻³.

Если после диффузии Er в потоке кислорода с поверхности Si удалить образовавшийся слой двуокиси кремния и провести отжиг в потоке аргона, то наблюдается увеличение концентрации акцепторных центров (рис. 2). Если диффузия Er проводилась в атмосфере аргона, то повторный отжиг этих же пластин в кислородной среде сопровождается уменьшением концентрации акцепторных центров. Эти факты свидетельствуют о том, что инертная атмосфера при термообработке кремния способствует образованию акцепторных центров, а окисляющая среда приводит к обратному эффекту.

Измерение температурной зависимости концентрации дырок показало, что в результате диффузии Er в кремний формируются мелкие

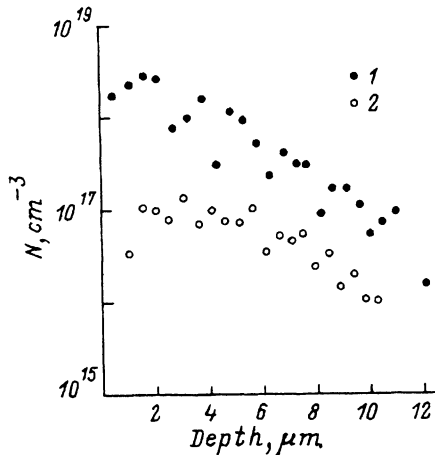


Рис. 1. Концентрационные профили акцепторных центров после диффузии Eg в *n*-Si в потоке аргона (1) и сухого кислорода (2) при 1250°C в течение 4 ч.

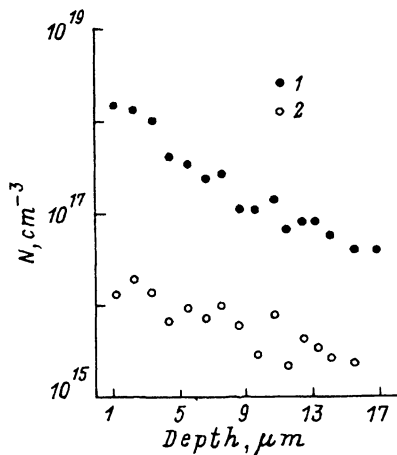


Рис. 2. Концентрационные профили акцепторных центров после диффузии Eg в потоке кислорода при 1250°C в течение 20 ч и последующего отжига при 1250°C в течение 6 ч в потоке аргона (1) или кислорода (2).

акцепторные центры, энергия ионизации которых очень близка к энергии ионизации водородоподобных мелких примесных состояний замещающих атомов бора. Типичная зависимость приведена на рис. 3. Атмосфера термообработки не оказывает влияния на величину энергии ионизации, а только определяет концентрацию электрически активных центров. Величина энергии ионизации также не зависит от типа проводимости исходной пластины кремния, в которую вводилась примесь Eg.

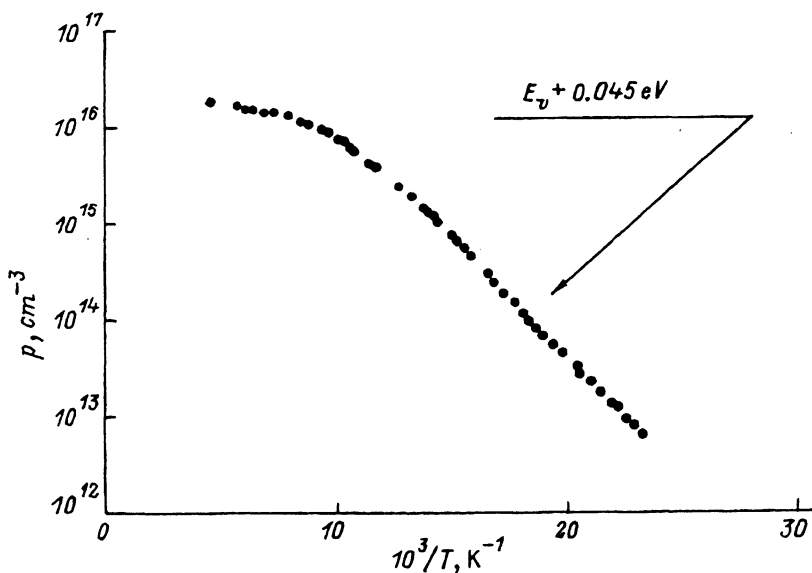
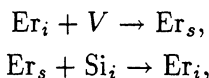


Рис. 3. Температурная зависимость средней концентрации носителей заряда p в легированном слое с дырочной проводимостью, образовавшемся после диффузии Eg в *n*-Si при 1250°C в течение 10 ч в потоке аргона. После диффузии Eg поверхностный слой образца был удален до глубины, на которой концентрация акцепторных центров составляла $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Зависимость концентрации рассматриваемых акцепторов от атмосферы термообработки, а также величина энергии ионизации этих центров позволяют предположить, что указанные акцепторные состояния принадлежат замещающим примесным атомам Er. В самом деле, хорошо известно (см., например, [7]), что термообработка Si в окисляющей атмосфере сопровождается его пересыщением собственными межузельными атомами Si_i, а термообработка в инертной атмосфере — пересыщением вакансиями V. С другой стороны, в [5] было показано, что при диффузии Er в Si из поверхностных источников при высоких температурах полная концентрация примесных атомов Er составляет $1 \cdot 10^{19} - 7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; это на несколько порядков величины превышает концентрацию формирующихся электрически активных центров в Si (Er); концентрация электрически активных центров практически не зависит от полной концентрации атомов Er, а определяется средой термообработки. В таком случае можно полагать, что концентрация данных акцепторных центров контролируется следующими квазихимическими реакциями:



где Er_i обозначает электрически неактивный атом Er, находящийся в межузельном положении.

Таким образом, полученные в данной работе результаты позволяют сделать следующие выводы.

Во-первых, несомненна роль избыточных собственных точечных дефектов в Si в формировании электрически активных центров с участием примеси Er.

Во-вторых, легирование Si примесью Er в процессе диффузии при высоких температурах ($T \geq 1100^\circ\text{C}$) приводит к образованию акцепторных уровней с энергией $\sim E_v + 45 \text{ мэВ}$, что весьма близко к энергии ионизации мелких акцепторных состояний замещающих атомов бора из той же группы Периодической системы элементов. Поэтому мы полагаем, что указанные акцепторные центры также принадлежат замещающим примесным атомам Er.

Список литературы

- [1] F.Y.G. Ren, J. Michel, Q. Sun-Padnano, B. Zheng, H. Kitagawa, D.S. Jacobson, J.M. Poate, L.C. Kimerling. MRS Symp. Proc., **301**, 87 (1993).
- [2] J.L. Benton, J. Michel, L.C. Kimerling, D.S. Jacobson, Y.-H. Xie, D.S. Eaglesham, E.A. Fitzgerald, J.M. Roate. J. Appl. Phys., **70**, 2667 (1991).
- [3] В.В. Агеев, Н.С. Аксенова, В.Н. Коковкина, Е.П. Трошина. Изв. ЛЭТИ (Л., 1977) вып. 211, с. 80.
- [4] Д.Э. Насыров, Г.С. Куликов, Р.Ш. Малкович. ФТП, **25**, 1653 (1991).
- [5] 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).
- [6] G. Masetti, M. Severi, S.Solmi. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-30**, 764 (1983).
- [7] 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).