

Влияние плотности поверхностных состояний на фотoluminesценцию Si–SiO₂-структур при комнатной температуре в области зона-зонной рекомбинации кремния

© А.М. Емельянов, Н.А. Соболев, S. Pizzini*

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

* INFN and Department of Materials Science,
I-20126 Milan, Italy

(Получена 2 апреля 2002 г. Принята к печати 11 апреля 2002 г.)

Исследована взаимосвязь между интенсивностью зона-зонной фотoluminesценции в монокристаллическом кремнии и плотностью поверхностных состояний на границе кремний–(диоксид кремния) в Si–SiO₂-структурах, изготовленных по технологии, используемой при промышленном изготовлении приборов с зарядовой связью. Для измерения плотности поверхностных состояний использовались отжиг Si–SiO₂-структур в водороде и γ -облучение.

1. Введение

Возникший в последнее время большой интерес к исследованиям зона-зонной фотoluminesценции (ФЛ) и электролюминесценции (ЭЛ) в непрямозонных монокристаллических полупроводниках обусловлен недавними сообщениями [1,2] о достижениях в некоторых кремниевых диодах высоких, почти не уступающих величинам в светодиодах на основе прямозонных полупроводников, значений квантовой эффективности (η) зона-зонной ЭЛ. Величины $\eta \approx 1\%$, согласно [1], могут быть получены при тщательной минимизации интенсивности рекомбинационных процессов в объеме и на поверхности полупроводника. В работе [3] исследовано влияние технологии обработки поверхности ряда непрямозонных полупроводников на зона-зонную ФЛ. В этой работе для монокристаллического кремния наибольшая интенсивность ФЛ была достигнута после термического окисления Si. Однако в [1–3] не приводятся данные о плотности поверхностных состояний (ППС) N_{ss} для исследованных образцов. Цель настоящей работы — сравнение изменений ППС и интенсивности зона-зонной ФЛ в монокристаллическом кремнии в результате γ -облучения и отжига в водороде.

2. Методика проведения эксперимента

Si–SiO₂-структура была изготовлена на основе полированной с лицевой стороны монокристаллической пластины *n*-Si КЭФ-15, ориентированной в плоскости (100). Слой SiO₂ был получен термическим окислением Si во влажном кислороде при 900°C. Толщина диоксида кремния составляла 100 нм. Si–SiO₂-структура для уменьшения плотности поверхностных состояний до $N_{ss} < 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ отжигалась в водороде при 900°C (30 мин) [4]. На поверхность SiO₂ термическим испарением Al в вакууме был нанесен слой металла, и на части поверхности с использованием фотолито-

графии сформированы полевые электроды размерами $1 \times 1 \text{ мм}^2$. На обратную сторону пластины также был нанесен Al для формирования обратного контакта к Si. Такая технология была выбрана из ряда промышленных технологий приборов с зарядовой связью (ПЗС), так как известно, что к технологии ПЗС предъявляются жесткие требования минимизации интенсивности генерационно-рекомбинационных процессов на дефектах в Si. В процессе выбора использовались различные исходные пластины Si, окисленные в сухом или влажном кислороде, различные отжиги в водороде и инертных газах. Используемая в работе технология обеспечивала максимальную интенсивность ФЛ при достаточно однородном ее распределении по площади окисленной пластины. Для увеличения плотности поверхностных состояний применялось γ -облучение структур от источника ⁶⁰Co мощностью $\sim 10^6 \text{ рад}(\text{SiO}_2)/\text{ч}$. Для определения N_{ss} производились измерения зависимостей от приложенного к структуре Al–SiO₂–Si напряжения малосигнальных емкости и активной проводимости [4]. Частота тестирующего напряжения составляла 60 и 6 кГц. Для возбуждения ФЛ использовалось модулированное механическим прерывателем видимое излучение ксеноновой лампы, выделенное фильтром из оптического стекла СЗС-24. Мощность излучения составляла $\sim 10 \text{ мВт/мм}^2$. Сигнал ФЛ регистрировался Ge-фотодиодом с использованием селективного нановольтметра. Для измерений спектральных характеристик применялся светосильный монохроматор с дифракционной решеткой. Исследования выполнялись при комнатной температуре.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Спектр ФЛ представляет собой пик с максимумом на длине волны $\lambda \approx 1.15 \text{ мкм}$ и полушириной 90 нм. Спектральные характеристики пика указывают на то, что он обусловлен непрямыми (с участием фононов)

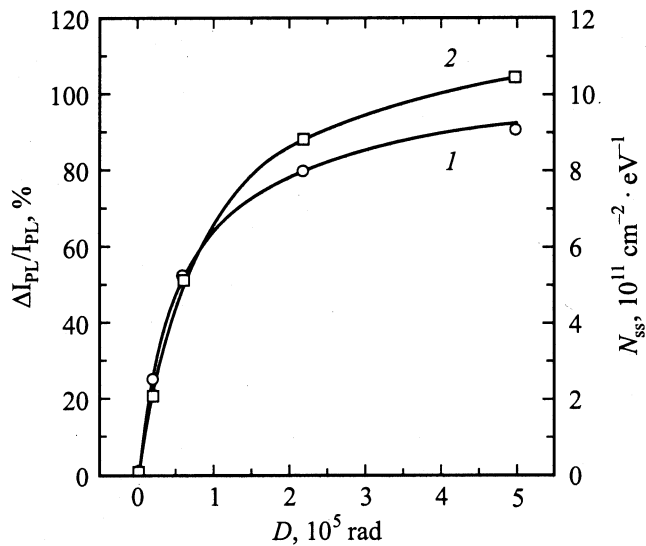


Рис. 1. Зависимости от дозы γ -облучения D относительного уменьшения интенсивности ФЛ в максимуме распределения по длинам волн $\Delta I_{PL}/I_{PL}$ и плотности поверхностных состояний N_{ss} для образца, прошедшего отжиг в водороде.

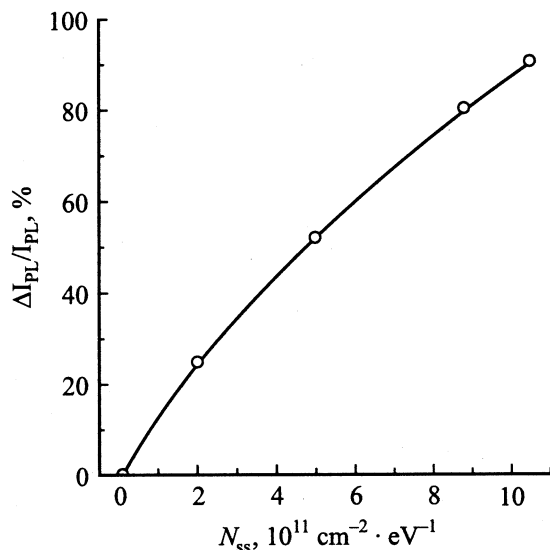


Рис. 2. Зависимость относительного уменьшения интенсивности ФЛ в максимуме $\Delta I_{PL}/I_{PL}$ от γ -стимулированной плотности поверхностных состояний для образца, прошедшего отжиг в водороде.

зона-зонными излучательными переходами в монокристаллическом кремнии [1–3]. В исходных (до отжига в водороде) Si–SiO₂-структурах величина ППС составляла $\sim 1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$. Отжиг в водороде приводил к уменьшению ППС до $\sim 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$. В результате такого отжига интенсивность ФЛ увеличивалась на $\sim 10\%$. На рис. 1 (кривая 1) приведена зависимость относительного уменьшения интенсивности ФЛ I_{PL} в максимуме распределения по длинам волн, именно $\Delta I_{PL}/I_{PL} = [I_{PL}(D=0) - I_{PL}(D)]/I_{PL}(D=0)$, от дозы D

γ -облучения образца, прошедшего отжиг в водороде. На этом же рисунке представлена зависимость ППС от дозы γ -облучения (кривая 2). Сравнение кривых 1 и 2 на рис. 1 показывает, что изменения ФЛ в результате γ -облучения коррелируют с генерацией поверхностных состояний на границе раздела Si–SiO₂ (вид кривых 1 и 2 практически одинаков). Количественная связь относительных изменений ФЛ и ППС показана на рис. 2. Известно, что γ -облучение может приводить к генерации не только рекомбинационных центров, определяемых ППС, но и других, в частности объемных рекомбинационных центров Si. Вклад последних в изменение ФЛ выделить сложно. Поэтому зависимость на рис. 2 следует рассматривать как максимально возможные изменения ФЛ в результате γ -стимулированной генерации ППС. Отметим, что из представленных, например, в [5] экспериментальных данных следует, что в широком диапазоне доз γ -облучения влиянием на рекомбинационные процессы изменений времени жизни в объеме Si по сравнению с изменением скорости поверхностной рекомбинации часто можно пренебречь.

4. Заключение

В работе получена количественная связь генерируемой γ -излучением ППС и максимальных относительных изменений интенсивности зона-зонной ФЛ в монокристаллическом кремнии для Si–SiO₂-структур, сформированных по технологии, используемой при промышленном изготовлении приборов с зарядовой связью. Исследовано влияние на интенсивность ФЛ отжига в водороде, приводящего к уменьшению ППС.

Авторы признательны С.П. Патракееву за помощь при изготовлении образцов.

Работа частично поддержана INTAS (грант № 2001-0194), РФФИ (грант № 02-02-16374) и РФФИ-Бюро научно-технического сотрудничества Австрии (грант № 01-01-02000 БНТС_a).

Список литературы

- [1] M.A. Green, J. Zhao, A. Wang, P.J. Reece, M. Cal. Nature, **412**, 805 (2001).
- [2] Wai Lek Ng, M.A. Lourenco, R.M. Gwilliam, S. Ledain, G. Shao, K.P. Homewood. Nature, **410**, 192 (2001).
- [3] V.Yu. Timoshenko, J. Rappich, Th. Dittrich. Appl. Surf. Sci., **123/124**, 111 (1998).
- [4] A.M. Emel'yanov, V.V. Golubev. Semiconductors, **28**, 1148 (1994).
- [5] В.С. Першенков, В.Д. Попов, А.В. Шальнов. *Поверхностные радиационные эффекты в ИМС* (М., Энергоатомиздат, 1988) с. 85.

Редактор Л.В. Шаронова

The influence of the surface state density on photoluminescence in Si-SiO₂-structures at room temperature over the range of silicon band-to-band recombination

*A.M. Emel'yanov, N.A. Sobolev, S. Pizzini**

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* INFM and Department of Materials Science,
I-20126 Milan, Italy

Abstract A correlation between the intensity of band-to-band photoluminescence in single crystal silicon and the density of surface states at the silicon-(silicon dioxide) interface had been studied in Si-SiO₂ structures fabricated by the technology of industrial charge coupled devices. To change the surface state density, the annealing of Si-SiO₂ structures in hydrogen and γ -irradiation were performed.