

Особенности полевой генерации неосновных носителей заряда в структурах Si–SiO₂

© А.П. Барабан, П.П. Коноров, В.А. Дмитриев[†], В.А. Прокофьев

Санкт-Петербургский государственный университет,
198504 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 14 июня 2012 г. Принята к печати 25 июня 2012 г.)

Рассмотрены особенности генерационных процессов в структурах Si–SiO₂ при наличии сильного электрического поля в окисном слое ($E_{\text{ок}} \approx 10$ МВ/см). Показано, что при достижении определенного порогового значения напряженности электрического поля происходит подключение дополнительного механизма генерации неосновных носителей заряда в кремнии, связанного с развитием процессов электролюминесценции в окисном слое.

Генерационные процессы в структурах Si–SiO₂ играют важную роль в работе полупроводниковых приборов и функциональных устройств, действие которых основано на создании в приповерхностной области полупроводника состояния неравновесного обеднения [1–3]. Эти процессы определяются генерацией неосновных носителей заряда (ННЗ) в области пространственного заряда (ОПЗ) кремния и на межфазовой границе Si–SiO₂ [1–3]. Для определения скорости генерации ННЗ обычно используют кривые релаксации неравновесной емкости после подачи на исследуемую структуру импульса обедняющего напряжения [3]. При этом интерпретация полученной таким образом полной скорости генерации в рамках тепловых механизмов встречает ряд трудностей [1,4,5]. Они указывают на то, что в определенных условиях существенную роль в процессах генерации могут играть полевые механизмы, связанные с процессами ударной ионизации в кремнии, ударной и термополевой ионизации примесных центров в ОПЗ полупроводника и на межфазовой границе полупроводник–диэлектрик и т.д. При этом представляет интерес исследование особенностей процессов генерации ННЗ при наличии сильного электрического поля не только в ОПЗ кремния, теоретическому и экспериментальному описанию которых уделено достаточное внимание (см., например, [1–3]), но и в окисном слое.

В данной работе на основании рассмотрения релаксации состояния неравновесного обеднения в приповерхностной области кремния при наличии сильного электрического поля в окисном слое предложен механизм дополнительной генерации неосновных носителей заряда в кремнии, обусловленный возникновением в окисном слое электролюминесценции (ЭЛ) в области собственного поглощения кремния.

Исследования проводились на структурах Si–SiO₂, полученных термическим окислением кремния КЭФ-5 в сухом кислороде при $T = 1150^\circ\text{C}$, с толщиной окисного слоя 140 нм в системе Si–SiO₂–электролит. Скорость генерации ННЗ определялась на основании измерения релаксационных характеристик высокочастотной (1 МГц)

неравновесной емкости после подачи импульса обедняющего напряжения различной амплитуды [6]. Перевод структуры Si–SiO₂ в состояние неравновесного обеднения осуществлялся из состояния плоских зон после предварительного заряжения имеющихся в окисном слое электронных и дырочных ловушек, что обеспечивало зарядовую стабильность исследуемой структуры в процессе последующих экспериментов. ЭЛ регистрировалась в диапазоне 250–800 нм в условиях, не приводящих к развитию пробоя в объеме окисного слоя [6]. В качестве электролита использовался 1 Н водный раствор Na₂SO₄. Все измерения выполнены при температуре 293°К.

Система Si–SiO₂–электролит отличается от системы с металлическим полевым электродом не только значительной высотой потенциального барьера (~ 4.2 эВ) на границе SiO₂–электролит, но и существенно меньшей (примерно на 4 порядка) инжекционной способностью электролитического полевого электрода [6]. В случае структур Si–SiO₂ это означает практически полную блокировку электронного тока в окисный слой вплоть до напряженности электрического поля на инжектирующем контакте 7.5 МВ/см [6]. При дальнейшем увеличении напряженности электрического поля в окисном слое происходит эффективная инжекция электронов из электролита в окисный слой по механизму Фаулера–Нордгейма [6], которая сопровождается возникновением электролюминесценции в диапазоне 250–800 нм [6,7]. ЭЛ в такой системе характеризуется сильной зависимостью интегральной интенсивности от напряженности электрического поля в окисном слое (рис. 1), связанной как с механизмом возбуждения свечения горячими электронами, так и с экспоненциальным ростом плотности протекающего тока [6].

На рис. 2 приведены кривые релаксации неравновесной емкости системы Si–SiO₂–электролит при различных амплитудах импульса обедняющего напряжения V_g . В области слабых полей ($V_g < 40$ В, кривые 1–3) генерация ННЗ определялась тепловыми механизмами. При этом зависимость $(C_0/C_{\text{min}})^2$ от V_g была линейной с наклоном, соответствующим паспортным данным используемого в качестве подложки кремния. В области $40 < V_g < 130$ В (кривая 4) вид кривых практически не

[†] E-mail: olgadmit@mail.ru

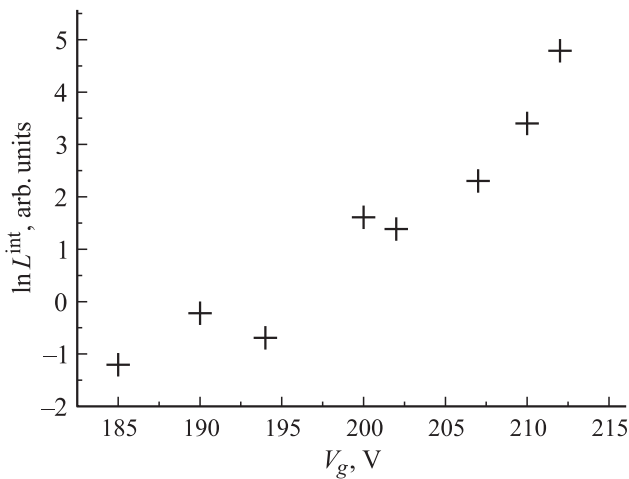


Рис. 1. Зависимость интегральной интенсивности электролюминесценции структур Si–SiO₂ в спектральном диапазоне 250–800 нм от напряжения на структуре.

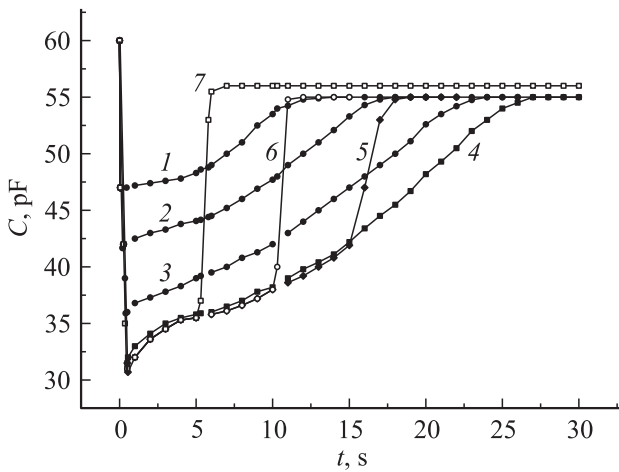


Рис. 2. Кривые релаксации неравновесной емкости системы Si–SiO₂-электролит соответствуют различным амплитудам импульса обедняющего напряжения V_g . Кривые 1–7 соответствуют значениям V_g , равным 18, 22, 30, 45, 140, 160, 190 В соответственно.

менялся с изменением V_g , что связано с развитием лавинного пробоя в ОПЗ кремния на начальном этапе релаксационного процесса. В этом случае падение напряжения в обедненном слое кремния не превышало величины, соответствующей началу пробоя, что приводило к постоянству C_{\min} и неизменности вида кривой релаксации неравновесной емкости. Величину напряженности электрического поля, вызывающего пробой в ОПЗ кремния, можно определить по перегибу на зависимости $(C_0/C_{\min})^2$ от V_g . В рассматриваемом случае она составляла $\sim 3 \cdot 10^5$ В/см, что хорошо согласуется с ранее полученными данными [8]. Увеличение амплитуды обедняющего импульса от 130 до 200 В (кривые 5–7) приводило к появлению на релаксационной кривой участка, который характеризовался резким ускорением

релаксации неравновесной емкости в момент установления в окисном слое электрического поля с напряженностью $E_{ox} \approx 8$ МВ/см. Кроме того, при наличии в окисном слое электрического поля с напряженностью более 12 МВ/см наблюдалось увеличение дифференциальной емкости вольт-фарадной характеристики системы Si–SiO₂-электролит в инверсионной области (кривая 7 при $t > 7$ с на рис. 2).

Вся совокупность экспериментальных данных позволила заключить, что наблюдаемый процесс ускорения релаксации неравновесной емкости в сильных электрических полях связан с увеличением скорости генерации ННЗ в кремнии. Характерной особенностью этого процесса является его пороговый характер. Данный механизм генерации проявляется при превышении напряженности поля величины ~ 8 МВ/см в окисном слое и обусловлен подключением дополнительного механизма генерации электронно-дырочных пар в кремнии за счет поглощения квантов света, образующихся в результате развития в окисном слое процесса ЭЛ. Появление дополнительного канала генерации ННЗ запускает лавинообразный процесс: дополнительное (по отношению к тепловой генерации) образование ННЗ приводит к перераспределению напряжения между кремнием и окисным слоем, в результате которого напряженность электрического поля в окисном слое растет, что приводит к экспоненциальному росту интенсивности ЭЛ и соответственно более эффективному увеличению концентрации ННЗ и т.д. Процесс прекращается после формирования инверсионного слоя и установления квазиравновесия в приповерхностной области кремния. Оценка скорости дополнительной генерации ННЗ за счет предложенного механизма с учетом величины протекающего тока и эффективности выхода ЭЛ по току дает величину порядка 10^{11} см⁻²с⁻¹, что вполне достаточно для реализации наблюдаемого эффекта. Необходимым условием для возникновения рассмотренного механизма генерации ННЗ является возникновение свечения в диэлектрическом слое при наличии в нем сильного электрического поля. Поскольку ЭЛ наблюдалась и в системах с твердым полевым электродом [9,10], то есть все основания говорить о существовании такого механизма и для систем диэлектрик-полупроводник с твердотельным полевым электродом (металл, поликремний). Эффективность данного канала генерации ННЗ может быть существенно увеличена за счет направленного формирования в окисном слое наведенных центров люминесценции путем внедрения ионов редких земель, ионной имплантации, особых условий формирования окисного слоя и т.д. [6,7]. Отмеченная связь процессов, протекающих в окисном слое в сильных электрических полях (электролюминесценция), с процессами генерации ННЗ в приповерхностной области кремния свидетельствует о возможности передачи информационных сигналов в пределах одного кристалла оптическим путем.

Таким образом, предложен полевой пороговый механизм генерации ННЗ в приповерхностной области

кремния структур Si–SiO₂ в результате поглощения значительной части свечения, возникающего в окисном слое под действием сильного электрического поля, обеспечивающего инжекцию электронов в окисный слой и их последующий разогрев.

Список литературы

- [1] В.Г. Литовченко, А.П. Горбань. *Основы физики микроэлектронных систем металл–диэлектрик–полупроводник* (Киев, Наук. думка, 1978).
- [2] Е.И. Гольдман, А.Г. Ждан, А.М. Сумарока. *ФТП*, **26**, 2048 (1992).
- [3] M. Zerbst. *Z. Angew. Phys.*, **22** (1), 120 (1966).
- [4] А.П. Барабан, Ю.А. Тарантов. *Микроэлектроника*, **8** (4), (1979).
- [5] Е.И. Гольдман. *ФТП*, **27**, 269 (1993).
- [6] А.П. Барабан, В.А. Дмитриев, Ю.В. Петров. *Электролюминесценция в твердотельных слоистых структурах на основе кремния* (СПб., СПб. ун-т, 2009).
- [7] A.P. Baraban, Yu.V. Petrov. *Semiconductors*, **42**, 1515 (2008).
- [8] С.М. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) т. 1.
- [9] P. Solomon, N. Klein. *J. Appl. Phys.*, **47**, 1023 (1976).
- [10] D.J. Di Maria, J.R. Kirtley, E.J. Pakulis. *J. Appl. Phys.*, **56**, 401 (1984).

Редактор Т.А. Полянская

Peculiarities of the minority charge carriers field generation in Si–SiO₂ structures

A.P. Baraban, P.P. Konorov, V.A. Dmitriev,
V.A. Prokof'ev

St. Petersburg State University,
198504 St. Petersburg, Russia

Abstract The peculiarities of the generation process in Si–SiO₂ structures in the presence of a strong electric field in the oxide layer ($\sim 10 E_{ox}$ MV/cm) are considered. It is shown that additional mechanism of minority carriers generation in silicon when a certain threshold value of the electric field strength has been reached. This mechanism is conditioned by the development of the electroluminescence process in the oxide layer.