

# Электролюминесценция в слоях $\text{SiO}_2$ в различных структурах

© А.П. Барабан, П.П. Конов, Л.В. Милоглядова, А.Г. Трошихин

Научно-исследовательский институт физики им. В.А. Фока Санкт-Петербургского государственного университета, 198904 Санкт-Петербург, Петродворец, Россия

E-mail: laramil@rabler.ru

(Поступила в Редакцию 30 июня 2003 г.

В окончательной редакции 4 сентября 2003 г.)

Методом электролюминесценции (ЭЛ) в системе электролит–диэлектрик–полупроводник исследовались окисные слои структур  $\text{Si-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{Si-SiO}_2$ , полученных различными способами. Спектры ЭЛ всех структур содержали полосу излучения 2.7 eV, характерную для излучательной релаксации возбужденных силиленовых центров. Проведено сравнительное исследование условий возникновения таких центров свечения в различных структурах, содержащих слои  $\text{SiO}_2$ , и уточнена их природа.

Работа поддержана КЦФЕ МО РФ (грант № PD02-1.2-356).

## 1. Введение

Изучение в слоях  $\text{SiO}_2$  процессов электролюминесценции (ЭЛ), спектр которой содержит ряд полос в диапазоне 250–800 nm [1–10], представляет несомненный интерес как для фундаментальных исследований электронных процессов в этих слоях, так и с точки зрения их практического применения. Последнее обстоятельство привлекает особое внимание в связи с активной разработкой и использованием плоских твердотельных экранов. С этой точки зрения наиболее перспективным представляется использование ЭЛ в слоях  $\text{SiO}_2$ , входящих в состав структур  $\text{Si-SiO}_2$  или структур на их основе, что позволило бы соединить технологию создания твердотельных экранов с планарной кремниевой технологией и способствовало бы существенному прогрессу в области визуального отображения информации.

Целью настоящей работы является сравнительное исследование спектрального распределения ЭЛ в слоях  $\text{SiO}_2$  на кремнии. При этом основное внимание уделено изучению полосы излучения 2.7 eV и природе центров, ответственных за эту полосу, которая является типичной для слоев  $\text{SiO}_2$ . Она проявляется в различных структурах, содержащих эти слои, как одна из наиболее ярких в спектре излучения. Сравнение условий возникновения этой полосы в различных структурах, содержащих слои  $\text{SiO}_2$ , может способствовать лучшему пониманию характера электронных процессов в указанных слоях в сильных электрических полях и уточнению природы соответствующих центров люминесценции.

## 2. Характеристика структур и методика исследований

В работе исследовались структуры  $\text{Si-SiO}_2$ , полученные различными способами.

1) Термическим окислением монокристаллического кремния КДБ-10 по стандартным технологиям ( $d_{\text{ок}} = 110$  nm).

2) Путем SIMOX-технологии, основанной на имплантации ионов кислорода с энергией 190 keV (доза

$1.8 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ ) в объем кремния при температуре 650°C с последующим отжигом при 1320°C в течение 6 h и травлением внешнего слоя кремния ( $d_{\text{ок}} = 400$  nm).

3) Термическим окислением кремния КЭФ-5 (100) во влажном кислороде при 950°C ( $d_{\text{ок}} = 250$  nm) с последующей имплантацией ионов аргона в объем окисного слоя, дозы имплантированных ионов составляли  $10^{13} - 3.2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ , а их энергия (130 keV) выбиралась таким образом, чтобы максимум распределения внедренных ионов находился посередине окисного слоя.

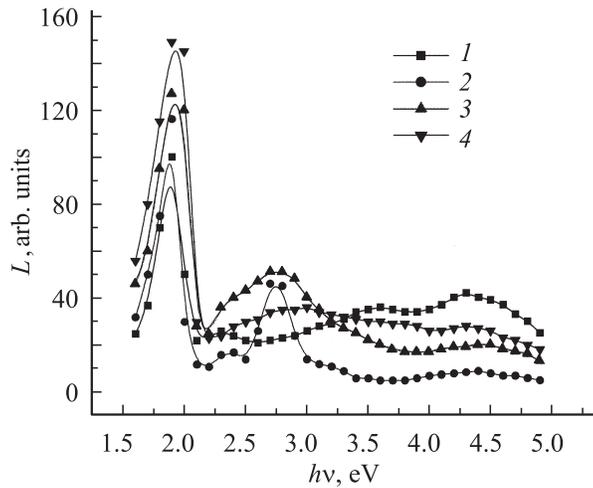
4) Анодным окислением (АО) монокристаллического кремния КДБ-10 в гальваностатическом режиме ( $d_{\text{ок}} = 100$  nm).

5) Осаждением слоя нитрида кремния толщиной 80 и 100 nm в реакторе пониженного давления из смеси силана и аммиака на структуры  $\text{Si-SiO}_2$ , термически сформированные в сухом кислороде при температуре 1100°C на подложке КДБ-10 (100) (структуры  $\text{Si-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$  с толщиной окисного слоя 40, 77 и 100 nm).

Спектры ЭЛ измерялись в спектральном диапазоне 250–800 nm в системе электролит–диэлектрик–полупроводник по методике, детально описанной в [1]. Преимущество такой системы при исследованиях ЭЛ состоит в возможности инжекции электронов и их разогрева в слоях  $\text{SiO}_2$  в широкой области полей, что является одним из необходимых условий возбуждения центров ЭЛ [1–3]. При этом возможность контролируемого травления окисного слоя с одновременным измерением спектрального состава ЭЛ позволяет определять пространственное распределение центров ЭЛ в слоях  $\text{SiO}_2$ .

## 3. Результаты эксперимента

Спектры ЭЛ структур  $\text{Si-SiO}_2$ , полученных термическим окислением кремния, при различных значениях напряженности электрического поля в окисном слое приведены на рис. 1. ЭЛ в полосе 2.7 eV наблюдалась при наличии в окисном слое электрического поля  $E_{\text{ок}}$ , превышающего некоторое пороговое значение  $E^*$  и



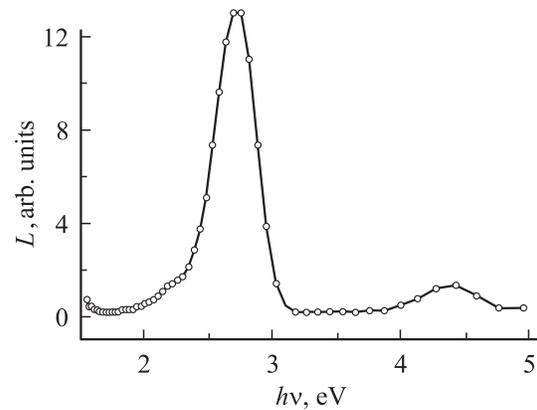
**Рис. 1.** Спектры ЭЛ структур Si-SiO<sub>2</sub>, полученных термическим окислением кремния в „сухом“ кислороде при температуре 1100°C, при различных значениях напряженности электрического поля в окисном слое  $E_{ox}$ . Толщина окисного слоя 110 nm. Рассчитанное значение  $E^* = 13.9$  MV/cm.  $E_{ox}$ , MV/cm: 1 — 13, 2 — 13.95, 3 — 14.1, 4 — 14.9.

приводящего к развитию процесса ударной ионизации (УИ) в объеме окисного слоя. Величина этого поля связана с толщиной окисного слоя  $d_{ox}$  соотношением  $E^* = C_1 + C_2/d_{ox}$  [3]. Как было показано в [3], появление ЭЛ в полосе 2.7 eV обусловлено наличием в окисном слое горячих электронов с избыточной энергией, превышающей 9 eV, необходимых для развития процесса УИ матрицы SiO<sub>2</sub>. При этом область локализации ЭЛ и соответственно центров люминесценции (ЦЛ) в этой полосе совпадала с областью максимальной вероятности процесса УИ и перемещалась при увеличении напряженности электрического поля от границы Si/SiO<sub>2</sub> к внешней границе окисного слоя. Прекращение процесса УИ (снижение напряженности электрического поля в окисном слое, или полевая деградация структуры Si-SiO<sub>2</sub>) сопровождалось гашением ЭЛ. Предварительное полевое воздействие на структуры Si-SiO<sub>2</sub> в области полей  $E_{ox} > E^*$  не приводило к последующему появлению ЭЛ в полосе 2.7 eV в области полей  $E_{ox} < E^*$ , не вызывающих УИ. Это означает, что именно процесс УИ приводил к образованию ЦЛ 2.7 eV в объеме окисного слоя и их последующему возбуждению горячими электронами, энергия которых может быть меньше 9 eV. При этом образующиеся ЦЛ являлись короткоживущими, поскольку прекращение процесса УИ в слое SiO<sub>2</sub> сопровождалось практически полным исчезновением таких центров.

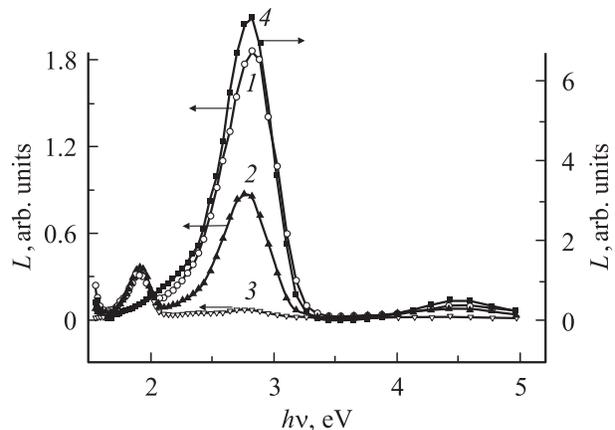
Спектры ЭЛ структур Si-SiO<sub>2</sub>, полученных по SIMOX-технологии, обладали рядом существенных отличий (рис. 2). В таких структурах полоса ЭЛ 2.7 eV являлась наиболее интенсивной в спектре, ее интенсивность примерно в 400 раз превышала интенсивность аналогичной полосы в спектрах термически сформированных структур Si-SiO<sub>2</sub>. Причем данная полоса излучения наблюдалась в электрических полях, существенно

меньших, чем те, которые необходимы для развития процесса УИ в объеме окисного слоя. Это указывает на образование ЦЛ 2.7 eV непосредственно в процессе формирования структур. Измерение спектров ЭЛ в сочетании со сравнением окисного слоя свидетельствовало о преимущественной локализации ЦЛ 2.7 eV в области границы Si-SiO<sub>2</sub>. При этом в спектре ЭЛ наблюдалась также полоса излучения с энергией  $4.4 \pm 0.1$  eV, хорошо аппроксимируемая гауссовым распределением с полушириной  $0.4 \pm 0.1$  eV. Другие полосы излучения отсутствовали.

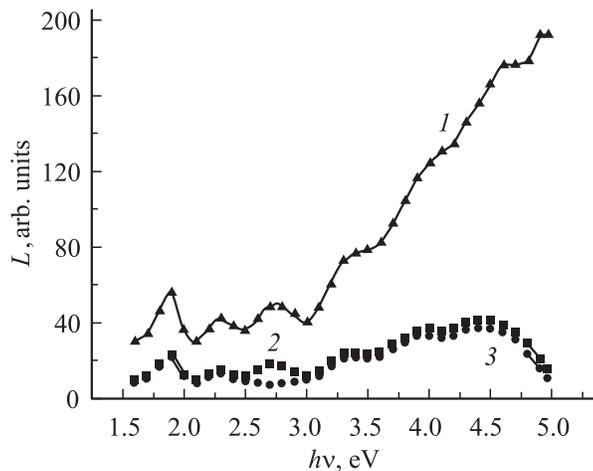
На рис. 3 приведены спектры ЭЛ структур Si-SiO<sub>2</sub>, подвергнутых имплантации ионами аргона в окисный слой. В этом случае спектры ЭЛ содержали три полосы излучения: 1.9, 2.7 и 4.4 eV. При этом полосы ЭЛ 2.7 и 4.4 eV присутствовали в спектрах ЭЛ, начиная с дозы имплантации  $10^{13}$  cm<sup>-2</sup>, и наблюдались в электрических полях, не приводящих к развитию процесса УИ в окисном слое. Дальнейшее увеличение дозы имплантации до  $10^{17}$  cm<sup>-2</sup> приводило к уменьшению интенсивностей этих полос излучения, которое сменялось их резким увеличением при переходе к дозе  $3.2 \cdot 10^{17}$  cm<sup>-2</sup>. При этом



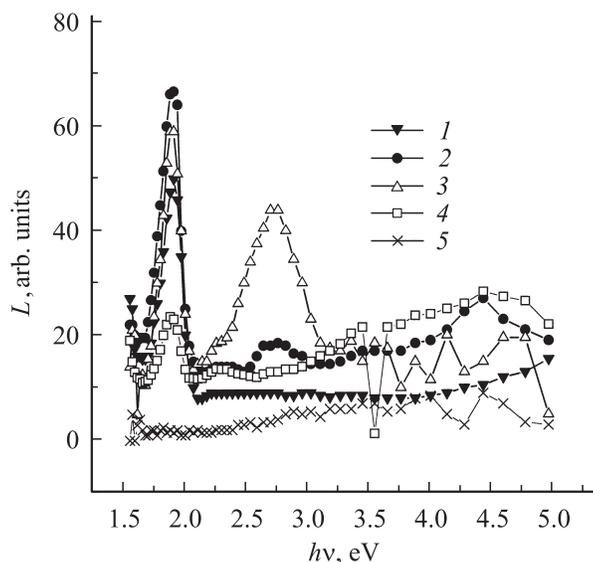
**Рис. 2.** Спектр ЭЛ структур Si-SiO<sub>2</sub>, сформированных по технологии SIMOX.



**Рис. 3.** Спектры ЭЛ структур Si-SiO<sub>2</sub> после имплантации ионов аргона.  $D$ , cm<sup>-2</sup>: 1 —  $10^{13}$ , 2 —  $10^{14}$ , 3 —  $10^{16}$ , 4 —  $3.2 \cdot 10^{17}$ .



**Рис. 4.** Влияние реакции анодного окисления на спектр ЭЛ системы Si-SiO<sub>2</sub>-электролит. Скорость роста окисла, nm/min: 1 — 1.5, 2 — 0.01. 3 — спектр ЭЛ анодно-сформированной структуры Si-SiO<sub>2</sub> в неокисляющем электролите.



**Рис. 5.** Спектры ЭЛ структур Si-SiO<sub>2</sub> (400 Å)-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (800 Å) (1), Si-SiO<sub>2</sub> (770 Å)-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (800 Å) (2), Si-SiO<sub>2</sub> (1000 Å)-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (1000 Å) (3), Si-SiO<sub>2</sub> (1000 Å)-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (1000 Å) после стравливания в плавиковой кислоте слоя Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (4) и структуры Si-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (5).

приводил к уменьшению интенсивностей обеих полос ЭЛ.

Процесс АО кремния, используемый для формирования структур Si-SiO<sub>2</sub>, сопровождался люминесценцией [11,12], спектр которой содержал четко выделяемую полосу излучения 2.7 eV (рис. 4). В гальваностатическом режиме АО кремния данная полоса появлялась в процессе формирования окисного слоя, начиная с толщины ~ 40 nm [1]. Прекращение процесса АО кремния путем замены окисляющего электролита (этиленгликоль с добавлением KNO<sub>3</sub>) на водный раствор нейтрального электролита (1N раствор Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) приводило к практически полному гашению данной полосы (рис. 4). Обратная замена электролита способствовала ее восстановлению. Спектр ЭЛ полученных АО структур Si-SiO<sub>2</sub> (который регистрировался в нейтральном электролите) аналогичен спектру ЭЛ термически сформированных структур. При этом полоса ЭЛ 2.7 eV наблюдалась только в электрических полях, превышающих некоторое критическое значение и приводящих к развитию процесса УИ в объеме окисного слоя. Однако величина критического поля в этом случае была примерно в 1.5 раза больше, чем в случае термически сформированных структур Si-SiO<sub>2</sub>. Предварительное полевое воздействие на анодно-сформированные структуры Si-SiO<sub>2</sub> в области полей, вызывающих УИ окисного слоя, не приводило к появлению ЭЛ в полосе 2.7 eV в более слабых электрических полях.

На рис. 5 представлены спектры ЭЛ структур Si-SiO<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. В этом случае спектр ЭЛ, полученный в условиях, исключающих возможность развития процесса УИ в слое SiO<sub>2</sub> ( $E_{ox} < E^*$ ), содержал четко выраженную полосу ~ 2.7 eV, интенсивность которой возрастала с увеличением толщины как слоя SiO<sub>2</sub>, так и слоя Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и сверхлинейно зависела от плотности тока, протекающего через структуру [5]. Последнее обстоятельство указывает на связь механизма возбуждения данной полосы с процессами разогрева электронов в окисном слое. Спектр ЭЛ, полученный после стравливания слоя нитрида кремния, показал отсутствие полосы ЭЛ 2.7 eV, что позволяет связать ее образование с процессами формирования слоистого диэлектрика, поскольку интенсивность ЭЛ самого слоя нитрида кремния была на порядок меньше (рис. 5).

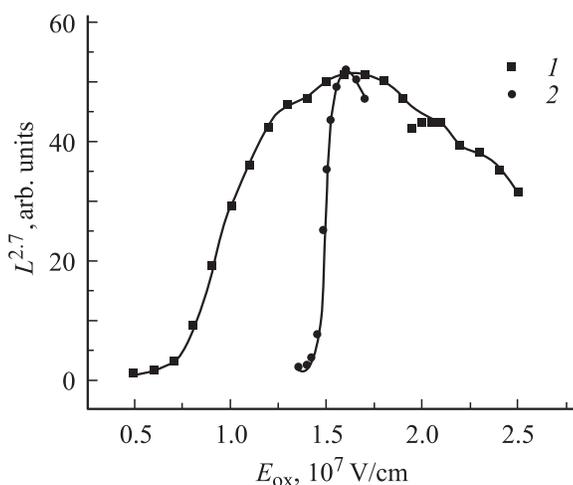
#### 4. Обсуждение результатов

Общей особенностью рассмотренных выше спектров ЭЛ различных структур, содержащих слои SiO<sub>2</sub>, является наличие в них полосы излучения 2.7 eV, аппроксимируемой гауссовым распределением с полушириной  $0.35 \pm 0.05$  eV. Это обстоятельство позволяет предположить, что ЦЛ, ответственные за данную полосу, связаны с дефектами, которые имеют общую природу во всех рассмотренных случаях. С наибольшей вероятностью можно предположить, что такими дефектами являются так называемые силиленовые центры (O<sub>2</sub> = Si:), которые представляют собой двухкоординированные по

отношению интенсивностей полос излучения 2.7 и 4.4 eV во всех случаях оставалось неизменным. Установлено, что ЦЛ, ответственные за полосы 2.7 и 4.4 eV, расположены в области 30–100 nm от границы Si-SiO<sub>2</sub> [4], т.е. максимум их распределения расположен ближе к границе с кремнием, чем максимум распределения имплантированного аргона. Увеличение дозы имплантации приводило к уширению распределения ЦЛ и смещению его максимума ближе к границе с кремнием [4]. Отжиг (500–1100°C, 10 s) структур Si-SiO<sub>2</sub> после имплантации (за исключением имплантации дозой  $3.2 \cdot 10^{17}$  cm<sup>-2</sup>)

кислороду атомы кремния. Согласно имеющимся литературным данным, для дефектов такого типа характерно наличие двух излучательных переходов  $\sim 2.7$  и  $\sim 4.4$  eV, энергия возбуждения которых составляет  $\sim 5$  eV [13]. При этом интенсивность излучательных переходов с энергией 2.7 eV при комнатной температуре превышает интенсивность перехода с энергией 4.4 eV. Механизмы образования этих центров в разных структурах могут быть различными, в то время как их возбуждение во всех рассмотренных выше случаях происходит за счет взаимодействия с горячими электронами, образующимися в диэлектрических слоях в сильных электрических полях и обладающими избыточной энергией выше 5 eV.

В случае термически сформированных структур Si-SiO<sub>2</sub> образование силиленовых центров, по-видимому, непосредственно связано с процессом УИ. При этом генерация электронно-дырочных пар в объеме окисного слоя приводит к разрыву двух связей Si-O в одном кремниво-кислородном тетраэдре, в результате чего образуются короткоживущие дефекты O<sub>2</sub> = Si: . Прекращение процесса УИ сопровождается восстановлением разорванных связей, стимулированным их пространственной близостью, и, следовательно, исчезновением ЦЛ. Пороговый характер зависимости интенсивности полосы ЭЛ 2.7 eV от напряженности электрического поля в окисном слое (рис. 6) определяется особенностями транспорта электронов в сильных электрических полях, обусловленными процессом умножения числа электронов за счет УИ и возникновением дополнительного канала диссипации избыточной энергии горячих электронов, связанного с появлением полосы ЭЛ 2.7 eV. Математическое моделирование процессов электронного переноса в SiO<sub>2</sub> с учетом перечисленных выше особенностей, выполненное в больцмановском кинетическом приближении с использованием макроэвристики метода Монте-Карло [14,15], позволило получить зависимость интенсивности полосы ЭЛ 2.7 eV от напряженности электри-



**Рис. 6.** Зависимость интенсивности полосы ЭЛ 2.7 eV от напряженности поля в окисном слое, полученная математическим моделированием [14,15] (1) и измеренная экспериментально (2).

ческого поля в окисном слое. Качественное совпадение результатов численных расчетов с полученными экспериментальными данными (рис. 6) подтверждает связь ЭЛ в полосе 2.7 eV с процессами УИ в объеме окисного слоя. Полоса ЭЛ 4.4 eV, также характерная для силиленовых центров, в этом случае не может быть четко выделена из-за ее значительно меньшей интенсивности.

В случае структур, полученных по SIMOX-технологии, образование силиленовых центров может быть связано с формированием кремниевых кластеров вблизи границы Si/SiO<sub>2</sub> в процессе изготовления структур [16]. Высокая концентрация дефектов типа двухкоординированного кремния позволяет в этом случае уверенно зарегистрировать вторую характерную для данного дефекта полосу излучения 4.4 eV. Это обстоятельство является дополнительным подтверждением правильности представлений о природе центров, ответственных за ЭЛ в полосе 2.7 eV.

Для объяснения механизмов образования силиленовых центров в имплантированных аргоном структурах необходимо принять во внимание то, что диссипация энергии имплантированных ионов происходит за счет взаимодействия с атомной и электронной подсистемами окисного слоя. При этом взаимодействие с электронной подсистемой сопровождается генерацией электронно-дырочных пар, а взаимодействие с атомной подсистемой — структурными нарушениями матрицы SiO<sub>2</sub>. Во внешней части окисного слоя процессы диссипации энергии в равной мере определяются взаимодействием с электронной и атомной подсистемами. Для объема окисного слоя наиболее вероятный канал диссипации энергии внедренного аргона обусловлен взаимодействием с атомной подсистемой, результатом которого является образование значительного количества разорванных связей Si-O вблизи максимума распределения внедренного аргона и смещение атомов Si и O в глубь окисного слоя (по оценкам [4] атомы O смещаются на расстояние 80–170 nm, а атомы Si — 30–70 nm от максимума распределения внедренного аргона). В результате этого процесса в объеме окисного слоя формируются две нестехиометрические области SiO<sub>x</sub>: с  $x > 2$  и  $x < 2$  [17]. Образование силиленовых центров происходит в обедненной кислородом области SiO<sub>2</sub> за счет разрыва в одном кремниво-кислородном тетраэдре двух связей Si-O и смещения атомов кислорода в глубь окисного слоя, что и определяет стабильность образующихся дефектов. Уменьшение интенсивностей полос ЭЛ 2.7 и 4.4 eV при отжиге объясняется частичным восстановлением разорванных кремниво-кислородных связей в объеме окисного слоя, приводящим к уменьшению концентрации двухкоординированных по кислороду атомов кремния.

Предположение о связи полосы люминесценции 2.7 eV с силиленовыми центрами находит подтверждение при изучении процессов АО кремния. Процесс АО кремния характеризуется линейным участком кинетики формирования окисного слоя [1], который сопровождается

люминесценцией в полосе 2.7 eV. Образование дефектов, ответственных за полосу ЭЛ 2.7 eV, происходит непосредственно в области формирования окисного слоя, где велика вероятность возникновения силиленовых центров. Поскольку для возбуждения силиленовых центров необходимы электроны с энергией, превышающей 5 eV, наблюдаемое нами излучение должно быть локализовано в объеме окисного слоя на некотором расстоянии от инжектирующей электроны границы, т.е. от электролита. Минимальная величина этого расстояния складывается из двух составляющих: длины туннелирования электронов из электролита в окисный слой и расстояния, необходимого для разогрева электронов до избыточной энергии  $\sim 5$  eV. Процесс АО кремния на этом участке кинетики происходит при постоянной напряженности электрического поля в окисном слое  $\sim 20$  MV/cm [1]. Длина туннелирования определяется величиной потенциального барьера для электронов ( $\sim 4.4$  eV) и напряженностью электрического поля на границе SiO<sub>2</sub>–электролит и составляет  $\sim 2$  nm. Расстояние, необходимое для разогрева электронов, получено путем математического моделирования процессов электронного транспорта в SiO<sub>2</sub> [18] и составляет  $\sim 8$  nm. Таким образом, на линейном участке кинетики (начиная с толщины слоя  $\sim 40$  nm) формирование окисного слоя происходит в объеме SiO<sub>2</sub> на расстоянии  $\sim 10$  nm от внешней границы, что хорошо согласуется с имеющимися литературными данными [19].

Существование в структурах Si–SiO<sub>2</sub>–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ЭЛ в полосе 2.7 eV в электрических полях, не приводящих к развитию УИ в объеме окисного слоя, связано с процессом нанесения слоя нитрида кремния на структуры Si–SiO<sub>2</sub>. Этот процесс сопровождается формированием переходного слоя, содержащего дефекты типа силиленового центра. Толщина переходного слоя (и, следовательно, концентрация силиленовых центров) увеличивается с ростом толщины окисного слоя и слоя нитрида кремния. По химическому составу переходный слой представляет собой слой оксинитрида кремния (SiN<sub>x</sub>O<sub>y</sub>), для которого характерны высокая концентрация силиленовых центров и люминесценция в полосе 2.7 eV [20]. Возбуждение ЦЛ в переходном слое происходит в данном случае за счет горячих электронов, образующихся в слое нитрида кремния. При используемом режиме возбуждения ЭЛ для слоев нитрида кремния характерно наличие электрического поля с напряженностью 6–9 MV/cm, что приводит к разогреву в нем электронов до энергий, превышающих 5 eV [21] и достаточных для возбуждения силиленовых центров в области межфазной границы SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

## 5. Заключение

Рассмотрение в качестве ЦЛ, ответственных за люминесценцию в полосе 2.7 eV, а также в полосе 4.4 eV, силиленовых центров (O<sub>2</sub> = Si:) позволило с единых позиций описать всю совокупность экспериментальных

данных, касающихся люминесценции в данной спектральной области в структурах кремний–диэлектрик, содержащих слои SiO<sub>2</sub>. Кроме того, в результате изучения люминесценции удалось получить дополнительные сведения как о процессах формирования структур кремний–диэлектрик, так и об электронных процессах, протекающих в этих структурах в сильных электрических полях. Для использования полосы 2.7 eV ЭЛ в исследованных структурах в качестве основы для создания плоских электрولюминесцентных твердотельных дисплеев наибольший интерес представляют структуры, полученные по SIMOX-технологии, и структуры Si–SiO<sub>2</sub>, полученные термическим окислением кремния с последующей имплантацией аргона в окисный слой, которые характеризуются наибольшей интенсивностью излучения в этой полосе.

## Список литературы

- [1] А.П. Барабан, В.В. Булавинов, П.П. Коноров. Электроника слоев SiO<sub>2</sub> на кремнии. Изд-во ЛГУ, Л. (1988). 304 с.
- [2] А.П. Барабан, П.П. Коноров, А.А. Кручинин, Ю.А. Тарантов. Электрохимия **20**, 4, 539 (1984).
- [3] А.П. Барабан, И.В. Климов, Н.И. Теношвили, Э.Д. Усеинов, В.В. Булавинов. Письма в ЖТФ **15**, 17, 44 (1989).
- [4] А.П. Барабан, Л.В. Милоглядова. ЖТФ **72**, 5, 56 (2002).
- [5] А.П. Барабан, Д.В. Егоров, А.Ю. Аскинази, Л.В. Милоглядова. Письма в ЖТФ **28**, 23, 14 (2002).
- [6] А.П. Барабан, П.П. Коноров, Л.В. Малявка, А.Г. Трошихин. ЖТФ **70**, 8, 87 (2000).
- [7] P. Solomon, N. Klein. J. Appl. Phys. **47**, 3, 1023 (1976).
- [8] D.J.Di Maria, J.R. Kirtley, E.J. Pakulis. J. Appl. Phys. **56**, 2, 401 (1984).
- [9] T.N. Theis, J.R. Kirtley, D.J.Di Maria. Phys. Rev. Lett. **50**, 10, 750 (1983).
- [10] A.J. Pepe, W. Chen, M. Oyler. J. Electrochem. Soc. **140**, 4, 1090 (1993).
- [11] A. Gee. J. Electrochem. Soc. **107**, 9, 787 (1960).
- [12] С.П. Мамина, Л.Л. Одынец. Электрохимия **1**, 3, 365 (1965).
- [13] Л.Н. Скуя, А.Н. Стрелецкий, А.Б. Пакович. ФХС **14**, 481 (1988).
- [14] A.P. Baraban, E.A. Semykina, M.B. Vaniouchov. Semicond. Sci. Technol. **15**, 546 (2000).
- [15] A.P. Baraban, E.A. Semykina, M.B. Vaniouchov. Phys. Low-Dim. Struct. **3/4**, 27 (2000).
- [16] V.V. Afanas'ev, A. Stesmans, A.G. Revesz. J. Appl. Phys. **82**, 5, 2184 (1997).
- [17] B. Garido, J. Samitier, S. Bota. J. Non-Crist. Sol. **187**, 101 (1995).
- [18] Е.А. Семькина, Т.Е. Никулина. Тез. докл. Междунар. конф. „Диэлектрики-97“. СПб (1997). Ч. 2. С. 70.
- [19] А.П. Барабан, И.В. Климов, П.П. Коноров. Вестн. ЛГУ (Сер. 4) **4**, 25, 71 (1988).
- [20] В.А. Гриценко. Строение и электронная структура аморфных диэлектриков в кремниевых МДП структурах. Наука, Новосибирск (1993). 280 с.
- [21] D.J.Di Maria, Y.R. Abernathy. J. Appl. Phys. **60**, 5, 1727 (1985).