

# Температурная зависимость дислокационной электролюминесценции в кремниевых светодиодах с кислородными преципитатами

© Н.А. Соболев, А.Е. Калядин, К.Ф. Штельмах, П.Н. Аруев, В.В. Забродский, Е.И. Шек

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: nick@sobolev.ioffe.rssi.ru

Поступила в Редакцию 7 апреля 2023 г.  
В окончательной редакции 31 мая 2023 г.  
Принята к публикации 6 июня 2023 г.

Исследована электролюминесценция кремниевых светодиодов, сформированных с участием кислородных преципитатов, при температурах 40–300 К. Имплантация ионов кислорода и многостадийные отжиги использовались при изготовлении светодиодов. Во всем диапазоне температур спектры хорошо аппроксимируются одной лоренцевой и четырьмя гауссовыми кривыми. В спектрах присутствуют линии дислокационной люминесценции D1–D4 (кривой Лоренца описывается линия D1) и кислородных преципитатов (OP). Положения максимумов линий D1, OP и D2 с изменением температуры измерения совпадают с температурной зависимостью ширины запрещенной зоны кремния, уменьшенной на значения 356, 330 и 303 мэВ соответственно. На температурных зависимостях интенсивностей электролюминесценции линий D1, OP и D2 наблюдаются участки возгорания и гашения, определены энергии активации этих процессов, и обсуждаются причины их появления.

**Ключевые слова:** светодиоды, дислокационная люминесценция, кремний, кислородные преципитаты.

DOI: 10.21883/FTP.2023.04.55900.4810

## 1. Введение

С тех пор как была обнаружена дислокационная фотолуминесценция (ФЛ) в кремнии при температуре жидкого гелия [1], проводились многочисленные исследования различных технологических методов, направленные на увеличение интенсивности дислокационной люминесценции (ДЛ) и температуры, при которой она наблюдается (см. [2–4] и литературу в них). Наиболее успешными оказались методы, основанные на лазерной перекристаллизации [5], одноосном сжатии [6] и имплантации ионов  $\text{Si}^+$  или  $\text{Er}^+$  с последующим отжигом в хлорсодержащей атмосфере (ХСА) [3,7], которые позволили создать светодиоды (СД) с дислокационной электролюминесценцией (ЭЛ) при комнатной температуре. В значительной степени это было достигнуто с помощью развития методов геттерирования (фосфором [5], алюминием [6], отжигом в хлорсодержащей атмосфере [3,7]) и водородной пассивации [6] центров безызлучательной рекомбинации. В технологии больших интегральных схем широко применяется так называемый метод внутреннего геттерирования для создания высококачественного тонкого приповерхностного слоя в кремнии (см. [8] и литературу в ней), в котором формировались приборные структуры. Суть метода заключалась в том, что проводились многоступенчатые отжиги в диапазоне температур 650–1000°С, в процессе которых в глубине пластины, выращенной методом Чохральского, формировались кислородные преципитаты, служившие эффективными геттерами для быстро диффундирующих примесей, являющихся эффективными рекомбинационными центрами. Однако оказалось, что

кислородные преципитаты при определенных условиях создают дислокации, которые, с одной стороны, могут быть эффективными центрами безызлучательной рекомбинации, а с другой — способствовать созданию центров ДЛ. Изучению люминесцентных свойств этих центров был посвящен целый ряд работ [9,10]. Даже изготовлены структуры с максимумом ФЛ в области  $\sim 1600$  нм при комнатной температуре [10], но информация о создании содержащих окисные преципитаты СД с ДЛ в литературе отсутствовала. Недавно нами было показано, что дополнительная имплантация ионов кислорода в сочетании с многостадийными отжигами позволяет увеличить интенсивность ДЛ и изготовить СД, работающий при комнатной температуре [11,12]. Цель настоящей работы заключалась в исследовании люминесцентных свойств СД, содержащих окисные преципитаты, в широком диапазоне температур.

## 2. Методика эксперимента

Для изготовления СД использовалась пластина кремния  $n$ -типа проводимости марки КЭФ-4.5 (100), выращенного методом Чохральского. Содержание кислорода и углерода, измеренное методом ИК-поглощения, равны  $\sim 8 \cdot 10^{17}$  и меньше  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  соответственно. Для создания однородного распределения атомов кислорода на глубине 0.3–0.8 мкм с концентрацией  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  проводилась имплантация ионов  $\text{O}^+$  при комнатной температуре. Условия имплантации рассчитаны с помощью программы SRIM-2013 [13,14]. При этом энергии ионов были равны 350, 225 и 150 кэВ,

а соответствующие дозы ионов составляли  $1.5 \cdot 10^{15}$ ,  $0.9 \cdot 10^{15}$  и  $0.7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Для растворения ростовых преципитатов кислорода, отжига радиационных дефектов, формирования кислородных преципитатов, дислокаций и других протяженных дефектов проводились трехступенчатые отжики в потоке аргона при температурах и временах  $1000^\circ\text{C}/15 \text{ мин} + 650^\circ\text{C}/7 \text{ ч} + 800^\circ\text{C}/4 \text{ ч}$ . Заключительный отжиг при  $1000^\circ\text{C}$  в течение 6 ч в хлорсодержащей атмосфере, представляющей собой поток кислорода, насыщенный парами четыреххлористого углерода с молярной концентрацией 1%, использовался для создания центров ДЛ и геттерирования быстро диффундирующих примесей. СД изготавливались по планарной технологии. Для создания  $p^+ - n$ -перехода со стороны имплантации ионов  $\text{O}^+$  вскрывались окна диаметром 2 мм в слое  $\text{SiO}_2$ , и в них методом газофазного осаждения наносился сильно легированный бором  $p^+$ -слой поликристаллического кремния (poly-Si). Для создания омического контакта на обратной стороне пластины осаждался сильно легированный фосфором  $n^+$ -слой poly-Si. Слои наносились при  $850^\circ\text{C}$  в течение 6 мин, концентрация легирующих примесей равнялась  $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , а толщина слоев была  $\sim 0.5 \text{ мкм}$ . Контакты формировались напылением алюминия толщиной 0.5 мкм. Спектры ЭЛ в диапазоне 1000–1650 нм измерялись на автоматизированном спектрометре на основе монохроматора МДР-23 и неохлаждаемого фотодиода InGaAs. Измерения ЭЛ проводились в диапазоне температур 40–300 К с точностью поддержания температуры  $\pm 1^\circ\text{C}$ . ЭЛ возбуждалась прямоугольными импульсами прямого тока с длительностью 15 мс, амплитудой 25 мА и частотой 32 Гц. Разрешение установки составляло 5 нм.

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены спектры ЭЛ при температурах 40–300 К. Плотность тока составляла  $0.86 \text{ А/см}^2$ . В спектрах доминирует линия ДЛ D1. С ростом температуры измерения наблюдается сначала коротковолновый, а затем длинноволновый сдвиг ее максимума и немонотонное изменение ее интенсивности. Второй по интенсивности является линия D2, положение максимума которой при 40–80 К находится при  $\sim 1400 \text{ нм}$ . В спектрах также присутствуют менее интенсивные D3 ( $\sim 1350 \text{ нм}$ ) и D4 ( $\sim 1240 \text{ нм}$ ) линии ДЛ. Обращает на себя внимание отсутствие относительно резкого спада между D1 и D2 линиями в области температур 40–110 К, что может быть обусловлено наличием дополнительного центра.

Спектры ЭЛ представляют собой набор отдельных линий, которые перекрываются между собой. Традиционно для выявления отдельных линий проводится разложение спектров на несколько составляющих пиков с помощью кривых Гаусса при фиксированной температуре [9,15]. Пример разложения спектра при 40 К приведен на

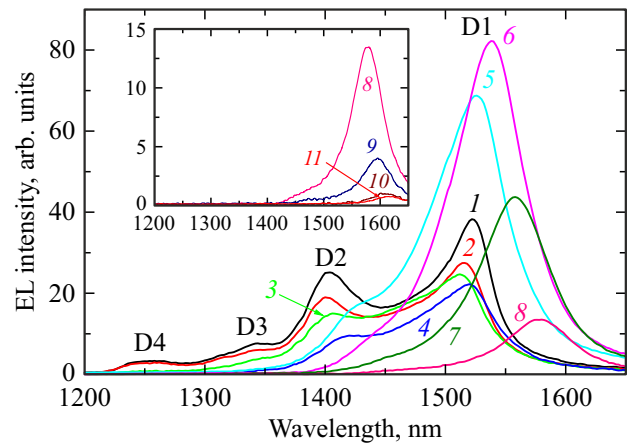


Рис. 1. Спектры ЭЛ светодиода при разных температурах  $T$ , К: 1 — 40, 2 — 50, 3 — 80, 4 — 110, 5 — 140, 6 — 170, 7 — 200, 8 — 230, 9 — 260, 10 — 290, 11 — 300.

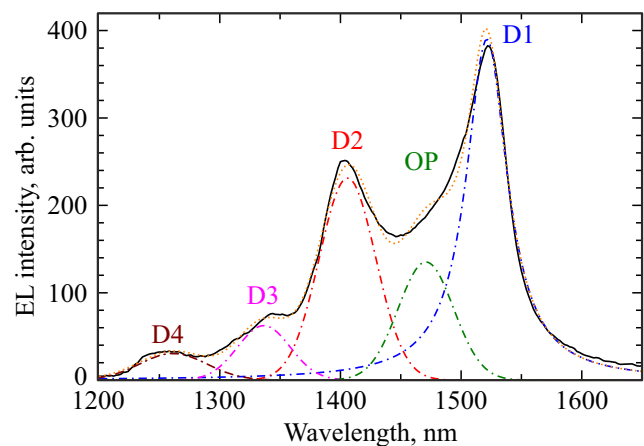
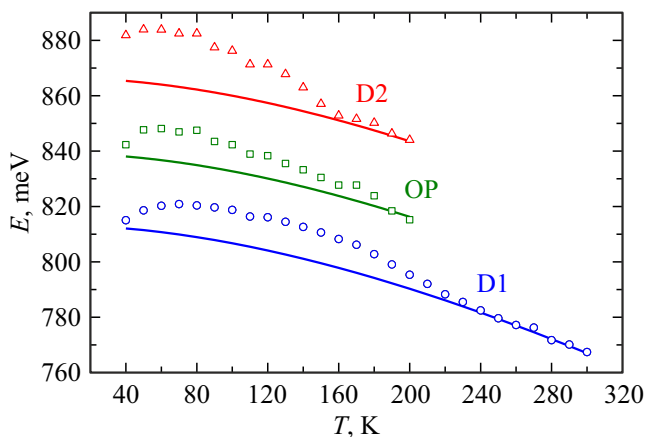


Рис. 2. Разложение спектра ЭЛ, измеренного при 40 К. Сплошная линия — экспериментальная кривая. Штрихпунктирные линии — компоненты, максимумы которых указаны в тексте. Штриховая линия — суммарная аппроксимирующая кривая.

рис. 2. Значения длин волн в максимумах кривых 1521, 1471, 1406, 1337 и 1261 нм свидетельствуют о том, что они принадлежат люминесцентным центрам D1, OP, D2, D3 и D4 соответственно [2,3,6,9,11,16–19]. Необычность данного случая моделирования методом наименьших квадратов в том, что минимальное отклонение расчетной кривой от экспериментальной достигается при представлении наиболее интенсивной линии (D1) кривой Лоренца, а остальных линий — при использовании кривых Гаусса. Возникновение такой особенности, по-видимому, обусловлено качественным отличием (реконструкцией) дефектной структуры центра D1, сформированной при участии кислородных преципитатов, по сравнению с другими технологическими методами. Интересно отметить, что линия OP непосредственно в данной работе в виде пика в спектрах ЭЛ не наблюдается, но хорошо



**Рис. 3.** Температурные зависимости энергетического положения максимумов линий ЭЛ D1, OP и D2 центров. Сплошные линии — аппроксимация формулой (1).

видна при разложении спектра ЭЛ. Кстати, предположение, что она принадлежит кислородным преципитатам, было высказано в [17] после разложения спектра ФЛ пластически деформированного образца, выращенного методом Чохральского и легированного азотом; но она также не наблюдалась в виде отдельного пика. В [20] было доказано, что она принадлежит свободным кислородным преципитатам. Недавно в работе [11] линия OP отчетливо наблюдалась в виде отдельного пика в спектрах ФЛ структур, прошедших такой же, как и в исследуемом СД, четырехстадийный отжиг, и в пределах погрешности экспериментов ее положение в спектре совпало с приведенным выше значением длины волны.

На рис. 3 приведены значения положений максимумов линий D1, OP и D2 в зависимости от температуры. Для всех трех линий при температурах  $> 50\text{--}70\text{ К}$  наблюдается сдвиг линии ЭЛ в длинноволновую сторону. Аппроксимация зависимостей (сплошные линии) для D1 и D2 линий показала, что их положения  $E(T)$  изменяются параллельно ширине запрещенной зоны кремния  $E_g(T)$ , уменьшенной на некоторое постоянное для данного центра значение  $\Delta E$ , которое не зависит от температуры, и описывается формулой

$$E(T) = E_g(T) - \Delta E, \quad (1)$$

где  $E_g(T) = 1169 - 0.49T^2/(T + 655)$  [21], энергия измеряется в мэВ, а температура  $T$  — в градусах Кельвина. В исследуемом СД с кислородными преципитатами для D1 линии  $\Delta E = 356\text{ мэВ}$  хорошо совпадает с соответствующими значениями для СД, полученных с помощью одноосного сжатия  $362\text{ мэВ}$  [6], и светоизлучающих структур, сформированных с помощью электронного облучения  $358\text{ мэВ}$  [18]. Для линии D2  $\Delta E = 303\text{ мэВ}$ , что практически совпадает со значением  $299\text{ мэВ}$  из [6]. Другой характерной особенностью температурных зависимостей положений D1 и D2 линий является аномальный сдвиг в коротковолновую сторону

на начальном участке от 40 до 70 К. Аналогичное поведение для этих линий наблюдалось в работах [6,22] и объяснялось ионизацией легирующей примеси фосфора. При этом превышение максимального значения энергетического положения линий D1 и D2 по сравнению с аппроксимирующими кривыми в наших структурах (для D1 линии при  $70\text{--}100\text{ К} \sim 12\text{ мэВ}$ , а для D2 линии при  $50\text{--}60\text{ К} \sim 20\text{ мэВ}$ ) и структурах, полученных с помощью одноосного сжатия (для D1 линии при  $50\text{--}60\text{ К} \sim 20\text{ мэВ}$ , а для D2 линии при  $60\text{ К} \sim 15\text{ мэВ}$ ) отличается незначительно.

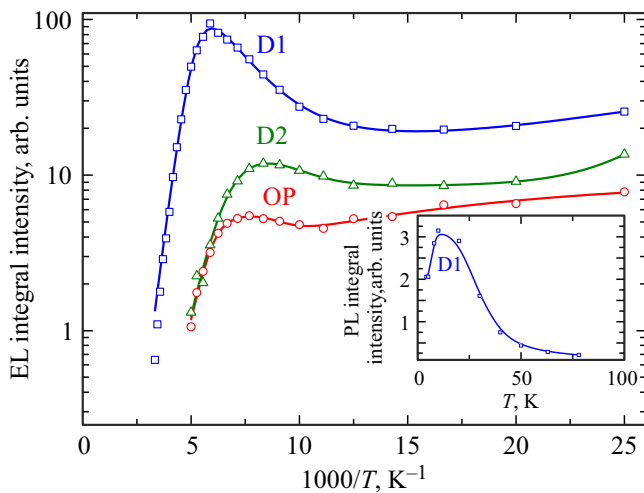
Для линии OP температурная зависимость положения ее максимума измерена впервые (рис. 3, кривая OP). С ростом температуры до 60 К пик линии движется в коротковолновую сторону, а затем — в длинноволновую сторону. Поведение линии хорошо аппроксимируется формулой (1), где  $\Delta E = 330\text{ мэВ}$ . Превышение максимального значения энергетического положения линии OP по сравнению с аппроксимирующей кривой при  $60\text{--}80\text{ К}$  не превышает  $12\text{ мэВ}$ . Полученные данные свидетельствуют о том, что поведение положения линий, принадлежащих протяженным дефектам (D1, D2 и OP), при изменении температуры подчиняется общей закономерности. Отметим, что аналогичное поведение положения максимума пика от температуры наблюдалось и для другого протяженного дефекта, так называемого {113} дефекта [23].

Зависимость интегральной интенсивности D1 линии ЭЛ от обратной температуры приведена на рис. 4. С ростом температуры наблюдаются участки гашения, возгорания и второго гашения интенсивности ЭЛ. Эта зависимость хорошо аппроксимируется формулой [24]

$$EL(T) = G/[1 + FT^{3/2} \exp(-K/kT)] + H/\{[1 + C/[1 + BT^{3/2} \exp(-E/kT)]] \times [1 + DT^{3/2} \exp(-W/kT)]\}, \quad (2)$$

где  $K$  — энергия активации гашения ЭЛ центра D1 при низкой температуре,  $E$  и  $W$  — энергии активации возгорания и гашения ЭЛ центра D1 при более высокой температуре соответственно,  $C$  — величина, включающая отношение сечений захвата носителей заряда на центр D1 и ловушки,  $G, F, H, B$  и  $D$  — параметры модели,  $k$  — постоянная Больцмана.

Гашение интенсивности ЭЛ при низкой температуре (первое слагаемое в формуле (2)) характеризуется энергией гашения  $K_{D1} = 14.0\text{ мэВ}$  и связано с наличием люминесцентного пика, который существует при  $T < 40\text{ К}$ . Это подтверждается результатом нашей предыдущей работы [11] (рис. 2), где было обнаружено, что в светоизлучающей структуре, представляющей собой пластину кремния, выращенного методом Чохральского с высокой концентрацией кислорода ( $\sim 8 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ ), подвергнутой многоступенчатому отжигам в тех же условиях, что и исследуемый СД, с ростом температуры измерения интенсивность ФЛ линии D1 увеличивалась и достигала



**Рис. 4.** Зависимости интегральных интенсивностей ЭЛ линий D1, OP и D2 от обратной температуры. Сплошные линии — аппроксимация формулой (2). На вставке показана зависимость интенсивности ФЛ от температуры для линии D1 из работы [11] (рис. 2).

максимума при 10–20 К, а в диапазоне 20–60 К уменьшалась на порядок (см. вставку на рис. 4). Интересно отметить, что наличие пика ФЛ для центра D1 в этой же области температур ранее наблюдалось в образцах, полученных с помощью прямого срачивания пластин кремния [25] и имплантации ионов  $\text{Si}^+$  [26]. Возгорание интенсивности ФЛ с ростом температуры объяснялось тем, что при низких температурах экситоны захватываются на мелкие центры, а с ростом температуры они освобождаются, диффундируют, а затем происходит их захват и последующая излучательная рекомбинация на люминесцентном центре D1 [24]. Энергии возгорания люминесценции в этих работах отличались (4 [25] и 6.8 мэВ [11]), что объясняется различным энергетическим положением мелких центров захвата в зависимости от технологии изготовления образцов [24]. Энергии гашения ФЛ составляли 11 [25], 12 [26] и 11.6 мэВ [11], что близко к энергии термической диссоциации экситона [27]. В исследуемом образце гашение интенсивности ЭЛ характеризуется практически тем же значением  $K_{D1} = 12.0$  мэВ, что и энергия гашения ФЛ в образце из [11], и обусловлено распадом экситонов и последующим захватом носителей заряда на более глубокие центры захвата.

При дальнейшем повышении температуры интенсивность линии D1 достигает максимума при  $T \sim 170$  К. Энергии возгорания и гашения равны  $E_{D1} = 35$  и  $W_{D1} = 197$  мэВ. Появление второго более высокотемпературного пика ФЛ центра D1 ранее наблюдалось в образцах, полученных с помощью совместной имплантации ионов  $\text{Si}^+$  и  $\text{B}^+$  [26]. Авторы предложили модель возникновения данного максимума: увеличение интенсивности ФЛ связано с термическим высвобождением носителей заряда с более глубоких центров (уровней)

захвата, их захватом на D1 центр и последующей излучательной рекомбинацией, а гашение интенсивности — с более эффективным захватом высвобожденных носителей заряда на центры безызлучательной рекомбинации, чем на D1 центр. Изменения значений температуры максимума и его интенсивности авторы связывали с изменением спектра глубоких центров захвата, образование которых обусловлено режимами имплантации бора. Эта же модель объясняет появление второго максимума и в нашем образце. Однако спектр глубоких центров захвата определяется условиями имплантации ионов кислорода и последующих отжигов.

Зависимости интегральной интенсивности D2 и OP линий ЭЛ от обратной температуры приведены на рис. 4 (кривые D2 и OP). С ростом температуры, как и в случае D1 центра, наблюдаются участки гашения, возгорания и второго гашения интенсивности ЭЛ. Эти зависимости также хорошо аппроксимируются формулой (2) [24]. По аналогии с центром D1 естественно связать гашение интенсивности ЭЛ центров D2 и OP при низких температурах с наличием люминесцентных пиков, существующих при  $T < 40$  К. Однако энергии гашения низкотемпературных пиков для этих центров  $K_{OP} = 4.6$  и  $K_{D2} = 32$  мэВ отличаются от значения для D1 центра. В работе [26] было обнаружено, что дополнительная имплантация ионов  $\text{B}^+$  сопровождается существенным изменением скорости гашения низкотемпературного пика ФЛ D1 линии при температурах  $> 40$  К, по сравнению с образцом, имплантированным только ионами  $\text{Si}^+$ . Авторы связали этот эффект с изменением структуры D1 центра и энергетического спектра образца. Разумно предположить, что изменение энергии гашения низкотемпературного пика ЭЛ центров D2 и OP обусловлено различием в структуре этих люминесцентных центров. С повышением температуры зависимости интенсивностей ЭЛ D2 и OP центров также имели максимумы при  $\sim 120$  и  $130$  К соответственно. Энергии возгорания и гашения интенсивности ЭЛ равны  $E_{D2} = 67$ ,  $E_{OP} = 117$ ,  $W_{D2} = 104$  и  $W_{OP} = 178$  мэВ. Появление этих высокотемпературных максимумов объясняется с помощью той же модели, которая была предложена для образцов, полученных с помощью совместной имплантации ионов  $\text{Si}^+$  и  $\text{B}^+$  [26]. Отличия в энергиях возгорания и гашения интенсивности ЭЛ обусловлены тем, что различные глубокие уровни участвуют в захвате носителей и последующих излучательной и безызлучательной рекомбинаций для центров D2 и OP.

#### 4. Заключение

Исследовано влияние температуры измерения в диапазоне 40–300 К на люминесцентные свойства кремниевых СД, изготовленных с помощью имплантации ионов  $\text{O}^+$  и четырех стадийного отжига при температурах 650–1000°C, в которых D1 линия ДЛ регистрируется при комнатной температуре. В спектрах ЭЛ

наблюдается набор линий, перекрывающихся между собой. Для выявления параметров отдельных линий было проведено разложение спектров на несколько составляющих, которое выявило образование четырех D1–D4 линий ДЛ и линии ОР, принадлежащей свободным кислородным преципитатам. При этом D1 линия описывается кривой Лоренца, а остальные — кривыми Гаусса. С изменением температуры положения пиков линий D1, ОР и D2 двигаются параллельно ширине запрещенной зоны кремния, уменьшенной на значения 356, 330 и 303 мэВ соответственно. Поведение пиков D1 и D2 линий хорошо соответствуют данным, полученным на образцах, изготовленных с помощью других технологий. Температурная зависимость положения ОР линии в спектре ЭЛ получена впервые. Температурные зависимости интенсивностей D1, ОР и D2 линий не являются монотонными, но поведение их однотипно. С ростом температуры наблюдается гашение интенсивности, которое является продолжением участка спада интенсивности низкотемпературного пика, максимум которого находится ниже 40 К. При дальнейшем росте температуры происходит образование высокотемпературного пика. Возгорание его интенсивности обусловлено освобождением носителей заряда, захваченных на глубокие ловушки, их захватом на люминесцентный центр и последующей излучательной рекомбинацией. Гашение высокотемпературного пика связано с захватом носителей заряда на более глубокие центры безызлучательной рекомбинации. Определены энергии активации гашения и возгорания интенсивностей ЭЛ для всех трех линий. Отличия в энергиях возгорания и гашения интенсивности ЭЛ обусловлены тем, что различные глубокие уровни участвуют в захвате носителей заряда и последующих излучательной и безызлучательной рекомбинаций для центров D1, ОР и D2. Появление высокотемпературных пиков люминесценции D1 линии в образцах, содержащих окисные преципитаты, и D2 линии в образцах, изготовленных с помощью различных методов, наблюдалось впервые. Температурная зависимость интенсивности электролюминесценции ОР и D2 центра ранее не исследовалась.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Н.А. Дроздов, А.А. Патрин, В.Д. Ткачев. Письма ЖЭТФ, **23**, 651 (1976).
- [2] Н.А. Соболев. ФТП, **44** (1), 3 (2010).
- [3] Н.А. Соболев, А.Е. Калядин, М.В. Коновалов, П.Н. Аруев, В.В. Забродский, Е.И. Шек, К.Ф. Штельмах, А.Н. Михайлов, Д.И. Тетельбаум. ФТП, **50** (2), 241 (2016).
- [4] A. Tereshchenko, D. Korolev, M. Khorosheva, A. Mikhaylov, A. Belov, A. Nikolskaya, D. Tetelbaum. Phys. Status Solidi A, **216**, 1900323 (2019).
- [5] E.O. Sveinbjornsson, J. Weber. Appl. Phys. Lett., **69**, 2686 (1996).
- [6] V. Kveder, V. Badylevich, E. Steinman, A. Izotov, M. Zeibt, W. Schreter. Appl. Phys. Lett., **84**, 2106 (2004).
- [7] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, В.В. Забродский, Н.В. Забродская, В.Л. Суханов, Е.И. Шек. ФТП, **41** (5), 635 (2007).
- [8] A. Borghesi, B. Pivac, A. Sassella, A. Stella. J. Appl. Phys., **77**, 4169 (1995).
- [9] S. Binetti, S. Pizzini, E. Leoni, R. Somaschini, A. Castaldini, A. Cavallini. J. Appl. Phys., **92**, 2437 (2002).
- [10] K. Bothe, R.J. Falster, J.D. Murphy. Appl. Phys. Lett., **101**, 032107 (2012).
- [11] Н.А. Соболев, А.Е. Калядин, К.Ф. Штельмах, Е.И. Шек. ФТП, **55** (10), 928 (2021).
- [12] Н.А. Соболев, А.Е. Калядин, К.Ф. Штельмах, П.Н. Аруев, В.В. Забродский, Е.И. Шек. ФТП, **56** (9), 904 (2022).
- [13] J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack. Nucl. Instr. Meth. B, **268**, 1818 (2010).
- [14] <http://www.srim.org>
- [15] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, E.I. Shek, O.V. Feklisova, E.B. Yakimov, T.V. Kotereva. Phys. Status Solidi C, **2** (6), 1842 (2005).
- [16] R. Sauer, J. Weber, J. Stolz, E.R. Weber, K.H. Kurster, H. Alexander. Appl. Phys. A, **36**, 1 (1985).
- [17] S. Binetti, R. Somaschini, A. Le Donne, E. Leoni, S. Pizzini, D. Li, D. Yang. J. Phys.: Condens. Matter, **14**, 13247 (2002).
- [18] Luelue Xiang, Dongsheng Li, Lu Jin, Shuming Wang, Deren Yang. J. Appl. Phys., **113**, 033518 (2013).
- [19] L.I. Fedina, A.K. Gutakovskii, T.S. Shamirzaev. J. Appl. Phys., **124**, 053106 (2018).
- [20] В.И. Вдовин, Л.И. Федина, А.К. Гутаковский, А.Е. Калядин, Е.И. Шек, К.Ф. Штельмах, Н.А. Соболев. Кристаллография, **66** (4), 597 (2021).
- [21] V. Alex, S. Finkbeiner, J. Weber. J. Appl. Phys., **79**, 6943 (1996).
- [22] E.A. Steinman, A.N. Tereshchenko, N.V. Abrosimov. Solid State Phenomena, **131–133**, 607 (2008).
- [23] А.Е. Калядин, К.Ф. Штельмах, П.Н. Аруев, В.В. Забродский, К.В. Карабешкин, Е.И. Шек, Н.А. Соболев. ФТП, **54** (6), 580 (2020).
- [24] G. Davies. Phys. Reports, **176**, 83 (1989).
- [25] E.A. Steinman, O. Kononchuk, A.N. Tereshchenko, A.A. Mazilkin. Solid State Phenomena, **156–158**, 555 (2010).
- [26] А.Н. Терешченко, Д.С. Королев, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.А. Никольская, Д.А. Павлов, Д.И. Тетельбаум, Э.А. Штейнман. ФТП, **52** (7), 580 (2018).
- [27] K.L. Shaklee, R.E. Nahory. Phys. Rev. Lett., **24**, 942 (1970).

Редактор Г.А. Оганесян

## Temperature dependence of dislocation-related electroluminescence in silicon light-emitting diodes containing oxygen precipitates

*N.A. Sobolev, A.E. Kalyadin, K.F. Shtel'makh,  
P.N. Aruev, V.V. Zabrodskiy, E.I. Shek*

loffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Electroluminescence has been studied in silicon light-emitting diodes containing oxygen precipitates at temperatures of 40–300 K. Oxygen ion implantation and multistage anneals are used for fabrication of the diodes. Over all temperature range, spectra are well approximated by one Lorentz and four Gaussian curves. Lines of dislocation-related luminescence D1-D4 (the D1 line is described by Lorentz curve) and oxygen precipitates (OPs) are present in the spectra. At temperature variation, peak positions of the D1, OP and D2 lines coincide with temperature dependence of the forbidden gap width reduced by values of 356, 330 and 303 meV respectively. Build and quenching areas are observed on temperature dependences of the electroluminescence intensities of the D1, OP and D2 lines, the activation energies of the processes are determined, and reasons of their appearance are discussed.