

# Влияние величины тока на электролюминесценцию дефектов, обусловленных высокотемпературным постимплантационным отжигом Si:(Er,O)-структур в хлорсодержащей атмосфере

© А.М. Емельянов, Е.И. Шек

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

E-mail: Emelyanov@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 26 ноября 2003 г.)

Исследована зависимость дефектной электролюминесценции (ЭЛ) от величины прямого тока в кремниевых структурах, полученных путем имплантации ионов эрбия и кислорода в монокристаллический кремний с последующим отжигом в хлорсодержащей атмосфере при 1100°C. При 80 К с ростом тока наблюдается увеличение энергий квантов, отвечающих максимумам двух пиков дефектной ЭЛ: от 0.807 и 0.87 eV до 0.85 и 0.92 eV соответственно. С ростом тока происходит также увеличение полуширины пиков и интенсивности ЭЛ. Для объяснения наблюдаемых эффектов развита предложенная ранее для дефектной ЭЛ в пластически деформированном кремнии модель, которая предполагает возможность создания инверсной населенности по четырехуровневой схеме.

Работа частично поддержана INTAS (грант N 2001-0194) и Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 02-02-16374).

## 1. Введение

Интерес к исследованиям люминесценции монокристаллического кремния (*c*-Si) обусловлен широким использованием этого материала в полупроводниковой технике, а также перспективами применения явления электролюминесценции (ЭЛ) *c*-Si в оптоэлектронике. Одним из видов люминесценции, наблюдавшихся в кремнии, является люминесценция дефектов в области длин волн  $\lambda \sim 1.2\text{--}1.6 \mu\text{m}$  [1–11] — так называемые *D*-пики, присутствие которых обычно связывают с наличием в кремнии дислокаций и кислородных преципитатов. Наиболее исследованными являются четыре *D*-линии люминесценции со следующими положениями на энергетической шкале при достаточно низких температурах (например, при температурах  $\leq 80 \text{ K}$ ) [6]: *D*1 —  $E \cong 0.807 \text{ eV}$ , *D*2 —  $E_m \cong 0.87 \text{ eV}$ , *D*3 —  $E_m \cong 0.95 \text{ eV}$ , *D*4 —  $E_m \cong 0.99 \text{ eV}$  ( $E_m$  — энергия фотонов в максимуме распределения по длинам волн). Такие пики ЭЛ и фотолюминесценции (ФЛ) наблюдались, например, в пластически деформированном кремнии. Два пика ФЛ вблизи указанных выше положений линий *D*1 и *D*2 наблюдались в кремниевых структурах, полученных имплантацией редкоземельного элемента Er с последующим отжигом в хлорсодержащей атмосфере (ХСА) при 1100°C [3–5,7]. Положения максимумов интенсивности излучения в таких структурах иногда не только несколько отличаются от указанных положений линий *D*1 и *D*2, но и зависят от особенностей технологии [4,7]. Дефектная ФЛ не проявлялась, если вместо ХСА при отжигах использовали аргон. Исследования Si:Er-структур [3,4,5,7] показали, что наблюдаемая дефектная ФЛ коррелирует с присутствием чисто краевых дислокаций.

В настоящей работе продолжено исследование обусловленной дефектами люминесценции в области длин волн  $\lambda \sim 1.2\text{--}1.6 \mu\text{m}$  имплантированных эрбием и отожженных в ХСА при 1100°C кремниевых структур. В частности, впервые исследовано влияние на дефектную ЭЛ величины прямого тока.

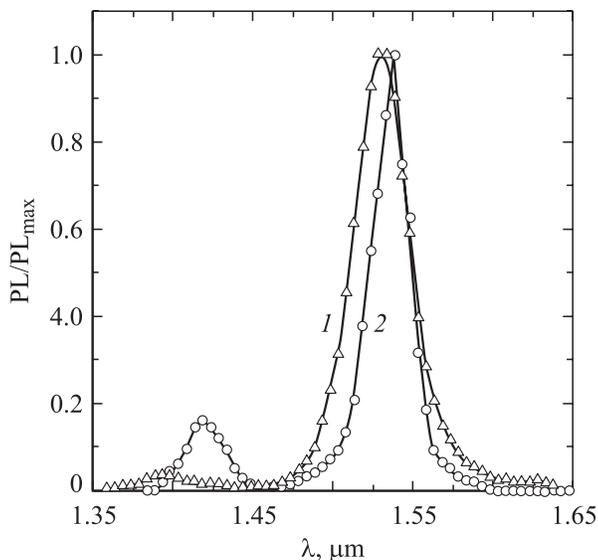
## 2. Методика эксперимента

Для исследований ЭЛ образцы № 1 изготавливались следующим образом. Ионы эрбия с энергиями 2.0, 1.6 и 0.8 MeV и дозами  $D = 1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  имплантировались в (100)-ориентированные и полированные пластины кремния *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением  $15 \Omega \cdot \text{cm}$ , выращенного по методу Чохральского. Дополнительно для увеличения вероятности образования кислородосодержащих дефектов в лицевую сторону пластин имплантировались ионы кислорода (0.28, 0.22, 0.17 и 0.11 MeV,  $D = 1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ). Для образования оптически активных центров проводился отжиг при  $T = 1100^\circ\text{C}$  (3 h) в ХСА, представляющей собой поток кислорода, содержащий 1 vol.% четыреххлористого углерода. Ионы бора (60 keV,  $D = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ) и фосфора (100 keV,  $D = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ) имплантировались в лицевую и обратную стороны пластин соответственно для создания сильнолегированных  $p^+$ - и  $n^+$ -слоев. Для уменьшения плотности дефектов, созданных имплантацией ионов бора и фосфора, применялся отжиг в ХСА при 1000°C в течение 30 min. Мезадиоды с рабочей площадью  $p$ - $n$ -перехода  $1.5 \text{ mm}^2$  изготавливались по обычной технологии с использованием термического напыления алюминия. ЭЛ возбуждалась прямоугольными импульсами тока на частоте 33 Hz с длительностью импульсов 3 ms. При измерениях люминесценции излу-

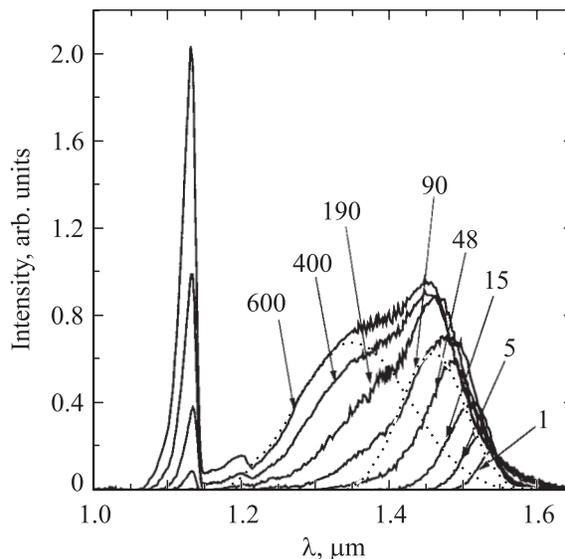
чение структур фокусировалось линзовой системой на входную щель монохроматора МДР-23 и на его выходе регистрировалось InGaAs неохлаждаемым диодом (с разрешением 7 nm в диапазоне  $\lambda = 1.0 - 1.65 \mu\text{m}$ ). При исследованиях ФЛ образцы освещались видимым излучением галогеновой лампы, сформированным с помощью полосового фильтра. Использовался механический прерыватель с частотой 36 Hz. Мощность излучения составляла около 50 mW. Спектры люминесценции были скорректированы с учетом спектральных характеристик фотоприемника и всего оптического тракта. Образцы № 2 для описанных далее исследований ФЛ были изготовлены следующим образом. Ионы эрбия с энергией 1.0 MeV и дозой  $D = 1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  имплантировались в лицевую сторону (100)-ориентированных и полированных пластин кремния *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением  $20 \Omega \cdot \text{cm}$ , выращенного по методу Чохральского (Cz-Si). Для образования оптически активных центров проводился отжиг при  $T = 1100^\circ\text{C}$  (1 h) в ХСА. После отжига с обратной стороны пластины стравливался слой кремния толщиной  $\sim 10 \mu\text{m}$ . Сформированные в результате ионной имплантации и отжига структурные дефекты в образце № 2 ранее были исследованы и описаны в [3].

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены нормированные на максимальную интенсивность спектры ФЛ образца № 2, полученные при освещении образца с лицевой (кривая 1) и обратной (кривая 2) стороны при 80 K. При освещении образца с обратной стороны максимумы в



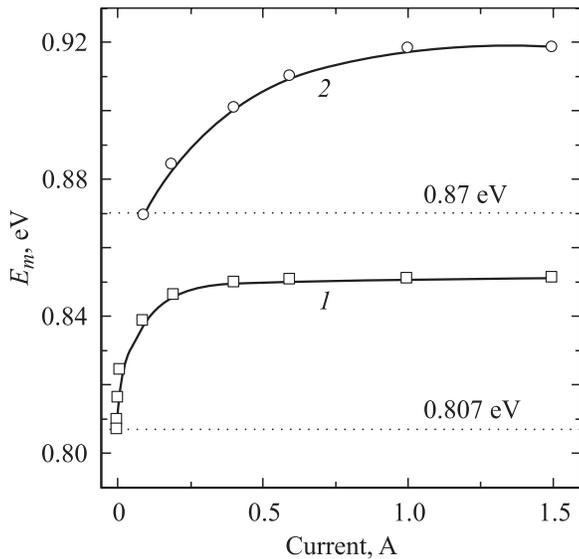
**Рис. 1.** Нормированные на максимальную интенсивность ( $PL_{\text{max}}$ ) зависимости интенсивности ФЛ (PL) от длины волны, полученные при освещении образца № 2 с лицевой (1) и обратной (2) стороны при 80 K.



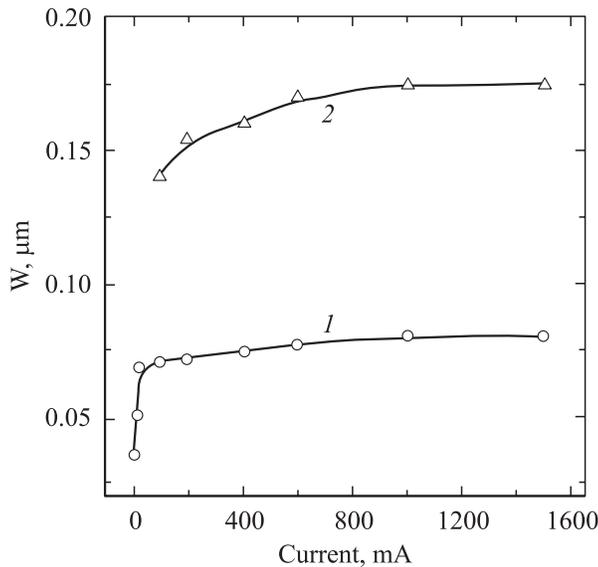
**Рис. 2.** Измеренные при 80 K и различных значениях тока (указаны около кривых в mA) спектры ЭЛ образца № 1 (сплошные кривые). Пунктирные кривые — гауссовы пики, описывающие спектр дефектной ЭЛ при токе 600 mA.

спектрах ФЛ расположены при 0.8065 и 0.873 eV, т.е. практически совпадают с обычно указываемыми в литературе положениями *D1*- и *D2*-линий. При освещении образца с лицевой стороны максимумы смещаются в коротковолновую часть спектра (0.810 и 0.89 eV), наблюдается уширение пиков от полуширины  $\sim 25$  до  $\sim 40$  nm. Ранее уширение *D1*-пика и смещение максимума в более коротковолновую область уже наблюдалось в пластически деформированных монокристаллах кремния, выращенных по методу Чохральского [2], как результат роста интенсивности возбуждения люминесценции. При освещении Si:Er-структур с обратной стороны концентрация носителей в дефектном оптически активном слое значительно меньше, чем при освещении с лицевой стороны. Различные концентрации тем больше, чем меньше диффузионная длина для экситонов. На основании полученных результатов исследования ФЛ и результатов работы [2] мы предположили, что и в Si:Er-структурах описанные выше различные положения и полуширины *D1*- и *D2*-пиков, а также зависимость их положения от технологии [4,7] могут быть связаны с различной концентрацией носителей, обуславливающих появление люминесценции, и со специфическими свойствами дефектов, ответственных за появление указанных пиков. Представленные далее результаты исследований ЭЛ в Si:(Er,O)-структурах подтверждают это предположение.

На рис. 2 приведены измеренные при температуре 80 K и различных значениях тока спектры ЭЛ образца № 1. В спектрах присутствуют пики ЭЛ с максимумами на длинах волн  $\sim 1.13$  и  $\sim 1.2 \mu\text{m}$ , которые в соответствии с современными представлениями обусловлены в основном излучательной рекомбинацией свободных экситонов с участием фононов. При токах  $\leq 15$  mA в



**Рис. 3.** Зависимости энергии квантов  $E_m$ , соответствующих максимумам гауссовых кривых, описывающих спектры дефектной ЭЛ при 80 К, от величины прямого тока.



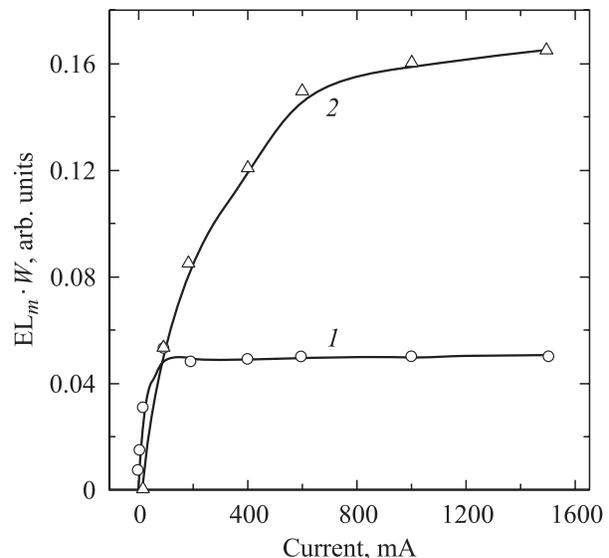
**Рис. 4.** Зависимости полуширин  $W$  гауссовых кривых, описывающих спектры дефектной ЭЛ при 80 К, от величины прямого тока. Номера кривых соответствуют приведенным на рис. 3.

спектрах ЭЛ наблюдался только один пик дефектной ЭЛ гауссовой формы. При дальнейшем увеличении тока (например, до величины  $\geq 90$  mA) спектр дефектной ЭЛ можно описать двумя гауссовыми кривыми. Пример разложения экспериментальной кривой ЭЛ при токе 600 mA на два гауссовых пика представлен на рис. 2 пунктирными кривыми. На рис. 3 приведены зависимости энергий квантов, соответствующих максимумам гауссовых кривых, описывающих экспериментальные спектры дефектной ЭЛ, от величины прямого тока. Из рис. 3 видно, что в исследованных структурах по

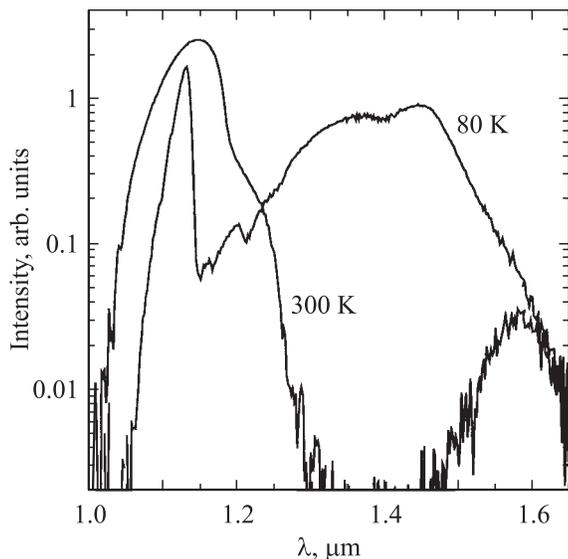
мере увеличения тока наблюдается значительный рост указанных энергий квантов. Только при относительно малых токах положение пиков соответствует общепринятому положению  $D1$ - и  $D2$ -линий. На рис. 4 приведены зависимости полуширин  $W$  гауссовых пиков от величины тока. Эти кривые характеризуют эффект уширения пиков ЭЛ. Изменение интегральной интенсивности ЭЛ  $D1$ - и  $D2$ -пиков можно охарактеризовать зависимостью от тока произведения интенсивности ЭЛ в максимуме гауссовой кривой ( $EL_m$ ) на полуширину  $W$ . Такие кривые показаны на рис. 5. Сравнивая результаты экспериментов, представленные на рис. 2–5, можно сделать следующие выводы. С увеличением тока для обоих пиков ЭЛ наблюдается монотонное увеличение  $E_m$ ,  $W$  и  $EL_m$ . При достаточно больших токах рост указанных параметров практически прекращается, два широких гауссовых пика дефектной ЭЛ можно охарактеризовать положениями максимумов  $E_{m1} \cong 0.85$  eV и  $E_{m2} \cong 0.92$  eV. Эти величины отличаются от общепринятых и указанных выше положений  $D1$ - и  $D2$ -пиков на  $\sim 40$ – $50$  meV.

При увеличении рабочей температуры доида до 300 К в исследованной области спектра кроме пика зонационной ЭЛ наблюдался пик дефектной ЭЛ с максимумом на длине волны  $\lambda \approx 1.59 \mu\text{m}$  (рис. 6). Для сравнения на рис. 6 также представлен спектр ЭЛ, измеренный при том же токе, но при 80 К. Положение максимума пика дефектной ЭЛ практически совпадает с положением максимума  $D1$ -пика люминесценции при 300 К в образцах кремния, в которых дислокации были сформированы путем обработки кристалла излучением мощного аргонового лазера [10].

Отметим, что описанное ранее в работе [2] увеличение  $E_m$  и  $W$  при росте интенсивности возбуждения лю-



**Рис. 5.** Зависимости произведения интенсивности ЭЛ в максимуме гауссовой кривой ( $EL_m$ ) на ее полуширину  $W$  от величины прямого тока. Номера кривых соответствуют приведенным на рис. 3.



**Рис. 6.** Спектры ЭЛ, измеренные при токе 500 мА и температурах 300 и 80 К.

минесценции в пластически деформированном кремнии относилось только к  $D1$ -пикам ( $D2$ -пик при этом не регистрировался). Кроме того, сдвиг положения максимума  $D1$ -пика в коротковолновую область спектра, измеренный в [2] при 80 К и плотности тока 400 мА/мм<sup>2</sup>, был существенно меньше, чем полученный в настоящей работе. Так, максимальное значение  $E_m$   $D1$ -пика в [2] составило только  $\sim 0.83$  эВ. Поскольку плотность тока, при которой достигалась величина  $E_{m1} = 0.85$  эВ для  $D1$ -пика в настоящей работе, практически совпадает с максимальной плотностью тока из работы [2], отмеченное различие, возможно, связано с тем, что в [2] были достигнуты меньшие, чем в настоящей работе времена жизни  $\tau_p$  неосновных носителей заряда. Действительно, с уменьшением  $\tau_p$  при прочих равных условиях уменьшается плотность неосновных носителей, создаваемых светом или инжекцией из  $p$ - $n$ -перехода. На основании изложенного выше можно предположить, что меньший сдвиг  $D1$ -пика ЭЛ с увеличением тока и отсутствие данных о  $D2$ -пике в том же образце из работы [2] связаны с тем, что в [2] не были достигнуты такие же высокие концентрации носителей заряда в базе диода, как в настоящей работе.

Объяснение обсуждаемых эффектов увеличения  $E_{m1}$  и  $W$  с ростом тока было предложено в работе [2]. Оно основано на представлении о том, что излучательные переходы происходят не между полосой уровней дефектов в запрещенной зоне кремния и одной из разрешенных зон (зоной проводимости или валентной зоной), а между уровнями дефектов, которые образуют полосы в запрещенной зоне кремния. При относительно небольших уровнях возбуждения люминесценции занятыми дырками оказываются только наиболее удаленные от потолка валентной зоны уровни в ближайшей к валентной зоне

полосе уровней дефектов. Поэтому энергия излучаемых квантов в этом случае минимальна. Можно представить ситуацию, когда подобный эффект обусловлен заполнением электронами только наиболее глубоких уровней в ближайшей к зоне проводимости полосе уровней дефектов. Интересно отметить, что при достаточно высоких уровнях возбуждения люминесценции описанная в [2] схема энергетических уровней подобна хорошо известной четырехуровневой системе, в которой легко реализовать инверсную населенность. В связи с этим рассмотренный в настоящей работе класс светоизлучающих структур может оказаться одним из наиболее перспективных для реализации в кремнии лазерного эффекта. В настоящей работе мы не получили результатов, опровергающих представленные в [2] объяснения эффектов. Однако результаты настоящей работы и [11] позволяют дополнить эти модельные представления. В [11] сравнивались спектры дефектной ФЛ пластически деформированных в чистых условиях пластин  $c$ -Si с различным содержанием кислорода и близкими плотностями дислокаций. В образцах с более низкой концентрацией кислорода (Fz-Si) максимумы  $D1$ - и  $D2$ -пиков ФЛ при 4.2 К располагались при 0.807 и 0.873 эВ соответственно. В образцах с более высоким содержанием кислорода (Cz-Si) максимумы  $D1$ - и  $D2$ -пиков находились при 0.825 и 0.877 эВ.  $D1$ - и  $D2$ -пики в Cz-Si были широкими и менее интенсивными, чем в Fz-Si. На основании изложенного выше можно предположить, что уширение и смещение в коротковолновую часть спектра  $D1$ - и  $D2$ -пиков обусловлены взаимодействием  $D1$ - и  $D2$ -центров с кислородом. Это приводит к различному (в зависимости от степени взаимодействия) положению энергетических уровней дефектов. В результате для части дефектов энергии излучаемых квантов увеличиваются по сравнению с их значениями при минимальном взаимодействии дефектов с кислородом. Для другой части дефектов взаимодействие с кислородом может исключать  $D1$ - и  $D2$ -дефекты из совокупности излучающих дефектов в кремнии. Изложенные модельные представления позволяют предположить, что различное влияние величины плотности тока на  $D1$ - и  $D2$ -пики люминесценции в Si:(Er,O)-структурах и пластически деформированном Cz-Si [2] может быть связано не только с различными величинами  $\tau_p$ , но и с различным содержанием кислорода в области дефектов.

#### 4. Заключение

В структурах Cz-Si:Er и Cz-Si:(Er,O) при температуре  $\sim 80$  К с ростом интенсивности возбуждения люминесценции наблюдается рост  $E_m$  и  $W$  для двух пиков дефектной люминесценции. При низких уровнях возбуждения величины  $E_m$  составляют  $\sim 0.807$  и  $\sim 0.87$  эВ, т.е. совпадают с общепринятыми положениями максимумов  $D1$ - и  $D2$ -пиков. При достаточно больших токах в Si:(Er,O)-диодах максимальные значения  $E_m$  состав-

ляют  $\sim 0.85$  и  $\sim 0.92$  eV. Эффект увеличения  $E_m$  и  $W$  подобен эффекту роста этих параметров для  $D1$ -пика с ростом интенсивности возбуждения люминесценции в пластически деформированном Cz-Si [2]. Это указывает на одинаковую природу дефектов, ответственных за  $D1$ -пик люминесценции, в пластически деформированном кремнии и исследованных нами структурах. Сопоставление полученных результатов и литературных данных показывает, что большая ширина спектров ЭЛ может быть обусловлена различным взаимодействием  $D1$ - и  $D2$ -дефектов с кислородом.

Авторы благодарят Н.А. Соболева за организационную помощь при изготовлении образцов.

## Список литературы

- [1] R. Sauer, J. Weber, J. Stolz. Appl. Phys. A **36**, 1 (1985).
- [2] V.V. Kveder, E.A. Steinman, S.A. Shevchenko, H.G. Grimmeiss. Phys. Rev. B **51**, 16, 10 520 (1995).
- [3] N.A. Sobolev, O.B. Gusev, E.I. Shek, V.I. Vdovin, T.G. Yugova, A.M. Emel'yanov. Appl. Phys. Lett. **72**, 25, 3326 (1998).
- [4] N.A. Sobolev, O.B. Gusev, E.I. Shek, V.I. Vdovin, T.G. Yugova, A.M. Emel'yanov. J. Lumin. **80**, 357 (1999).
- [5] Н.А. Соболев, Е.И. Шек, А.М. Емельянов, В.И. Вдовин, Т.Г. Югова. ФТП **33**, 6, 656 (1999).
- [6] S. Pizzini, M. Guzzi, E. Grilli, G. Borionetti. J. Phys.: Cond. Matter. **12**, 10 131 (2000).
- [7] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, E.I. Shek, V.I. Vdovin, T.G. Yugova, S. Pizzini. J. Phys.: Cond. Matter **14**, 13 241 (2002).
- [8] С.А. Шевченко, А.Н. Изотов. ФТТ **45**, 2, 248 (2003).
- [9] S. Pizzini, E. Leoni, S. Binetti, M. Acciarri, A. Le Donne, B. Pichaud. Proc. of 10th Int. Autumn Meeting „Gadest 2003“. Germany (2003). P. 273.
- [10] E.Ö. Sveinbjörnsson, J. Weber. Appl. Phys. Lett. **69**, 18, 2686 (1996).
- [11] M. Acciarri, S. Binetti, O.V. Feklisova, E.A. Steinman, E.B. Yakimov. Proc. of 10th Int. Autumn Meeting „Gadest 2003“. Germany (2003). P. 453.