

Краевая электролюминесценция эффективного точечного кремниевого светодиода в области температур 80–300 К

© А.М. Емельянов[†]

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

(Получена 29 января 2008 г. Принята к печати 4 февраля 2008 г.)

В области температур 80–300 К измерены спектры краевой электролюминесценции точечных кремниевых светодиодов с площадью p – n -перехода 0.008 мм^2 . Обнаружена рекордная стабильность положения максимума спектра при температурах 130–300 К. При 80 К проведены исследования спектральных характеристик светодиодов при различных плотностях тока до 25 кА/см^2 . В отличие от ранее описанных результатов исследования при 300 К, при температуре 80 К не наблюдалось значительного уменьшения квантовой эффективности, обусловленного проявлением оже-рекомбинации. Анализ спектров электролюминесценции при 80 К в широком диапазоне токов указывает на то, что механизм излучательной рекомбинации свободных экситонов не является определяющим при всех исследованных токах во всей излучающей области базы точечного светодиода.

PACS: 78.60.Fi, 85.40.Ls, 85.60.Dw

1. Введение

Растущий интерес к исследованиям краевой (в области межзонных переходов) люминесценции в монокристаллическом кремнии (c -Si) обусловлен сообщениями о достижении высокой квантовой эффективности и мощности светодиодов на основе c -Si [1–4]. Кроме того, измерения параметров краевой люминесценции в последние годы находят все большее применение как метод определения эффективных времен жизни неосновных носителей заряда (τ) в c -Si (см., например, [5–8]). Согласно [5], люминесцентный метод имеет ряд преимуществ перед традиционными методами определения τ , например из измерений фотопроводимости. В случае использования фотолюминесценции он позволяет быстро и бесконтактно определять распределение τ по площади полупроводниковой пластины. Этот метод был разработан применительно к низким уровням инжекции. Поэтому исследования краевой люминесценции при больших уровнях инжекции и различных температурах может позволить расширить его функциональные возможности.

Подавляющее большинство предшествующих исследований краевой электролюминесценции (ЭЛ) c -Si было выполнено на плоскостных диодах, т.е. диодах, в которых линейные размеры эмиттера больше диффузионной длины неосновных носителей заряда в базе диода (см., например, [9–15]). Краевая ЭЛ так называемых точечных диодов [16] (в которых линейные размеры p – n -перехода сопоставимы с диффузионной длиной неосновных носителей в базе диода или меньше ее), насколько нам известно, исследовалась только при комнатной температуре [17]. Характеристики краевой ЭЛ точечных светодиодов при более низких температурах представляют как научный, так и практический интерес, поскольку кремниевые светодиоды с малыми

размерами перспективны для использования в кремниевой оптоэлектронике и находят применение, например, при изучении люминесценции дефектов в кремнии при низких температурах [18], обеспечивая высокие плотности тока и минимальные размеры излучающей площади поверхности. Возможность достижения высоких плотностей тока позволяет из исследований ЭЛ точечного диода получать полезную информацию о физических процессах в сильноточных полупроводниковых приборах на основе кремния, особенно если протекающий ток в них по тем или иным причинам локализован на малой площади.

Цель настоящей работы состояла в проведении исследований эффективного точечного светодиода при температурах ниже комнатной, вплоть до температуры жидкого азота.

2. Экспериментальные условия

Диоды были изготовлены на монокристаллической пластине кремния КЭФ-90 толщиной $\sim 350 \text{ мкм}$, ориентированной в плоскости (111). Пластина была окислена термически. На лицевой поверхности пластины в пленке SiO_2 вытравливались отверстия диаметром $D = 0.1 \text{ мм}$. Для формирования p – n -переходов в эти отверстия при 850°C проводилось газофазное осаждение легированного бором (концентрация бора $N_B \approx 10^{21} \text{ см}^{-3}$) поликристаллического кремния. На обратную сторону пластины после стравливания окисной пленки для обеспечения омического контакта при 800°C наносился слой поликристаллического кремния, легированного фосфором (концентрация фосфора $N_P \approx 10^{21} \text{ см}^{-3}$). Далее, на лицевую и обратную стороны пластины напылялись слои Al, а на лицевой стороне проводилось стравливание излишков поликремния и Al для формирования изолированных диодов с площадью p – n -перехода и алюминиевого покрытия $\sim 8 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$. Контакты к диоду

[†] E-mail: Emelyanov@mail.ioffe.ru

выполнялись с помощью ультразвуковой сварки. При измерении спектров ЭЛ излучение с лицевой поверхности, выходящее из кремния за краем электрода через пленку SiO₂, фокусировалось линзовой системой на входную щель монохроматора МДР-23 и на его выходе регистрировалось InGaAs неохлаждаемым диодом (с разрешением 6 нм). Использовались селективный нановольтметр и компьютерная обработка выходного сигнала. Спектры были скорректированы с учетом спектральной характеристики фотоприемника и всего оптического тракта. Температура образца определялась по температуре массивного медного основания, к которому плотно прижимался светодиод. Для возбуждения ЭЛ к диоду прикладывались импульсы практически прямоугольной формы при длительности 1 мс, временах нарастания и спада < 1 мкс и скважности 30. Методика определения η_{ext} была описана в [17].

Результаты всесторонних исследований такого диода, но только при комнатной температуре, описаны в работе [17], в которой было также показано, что исследованный диод относится к категории точечных, которые совершенно не согласуются с моделью плоскостного диода [16].

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены измеренные при прямом токе 0.1 А и различных температурах спектры ЭЛ исследованного *c*-Si-светодиода. Как видно, основные различия спектров связаны с их уширением при росте температуры. Уширение спектров, как и для плоскостных диодов [9], приводит к росту интегральной интенсивности ЭЛ при возрастании температуры от 80 до 300 К. Смещение длинноволновой части спектра обусловлено уменьшением ширины запрещенной зоны *c*-Si (E_g) по

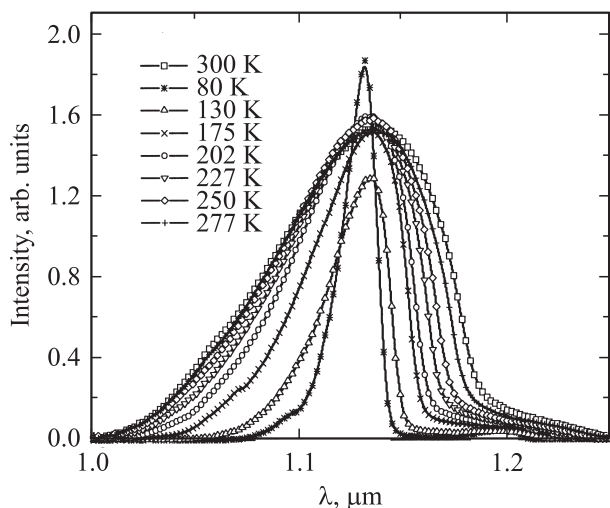


Рис. 1. Спектры ЭЛ светодиода при различных температурах и прямом токе 0.1 А.

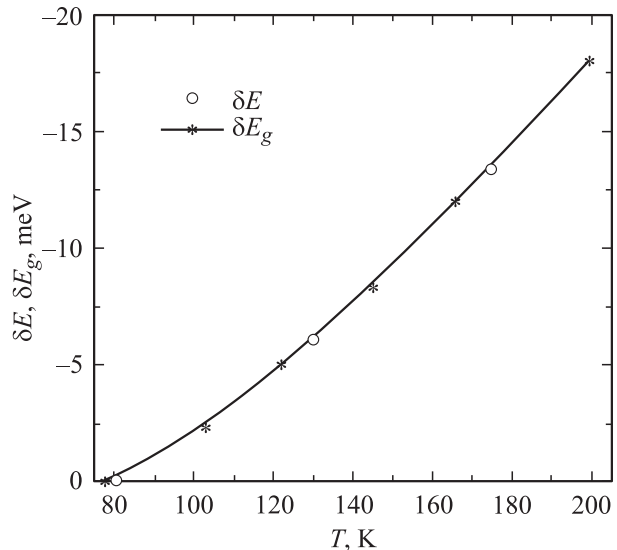


Рис. 2. Зависимости от температуры T изменения ширины запрещенной зоны *c*-Si (ΔE_g) относительно E_g при $T = 80$ К и изменения (ΔE) энергии кванта, соответствующего половине нормированной пиковой интенсивности ЭЛ на длинноволновом участке спада спектра ЭЛ, относительно энергии указанного кванта при 80 К.

мере роста температуры диода. Это подтверждается сравнением представленных на рис. 2 зависимости от температуры T изменения ширины запрещенной зоны *c*-Si (ΔE_g) относительно E_g при $T = 80$ К (построенной по результатам работы [19]) и изменения энергии кванта, соответствующего половине нормированной пиковой интенсивности ЭЛ на длинноволновом участке спада спектра ЭЛ, (ΔE) относительно энергии указанного кванта при 80 К. Для нахождения ΔE спектры ЭЛ были нормированы на максимальную интенсивность ЭЛ в каждом спектре и перестроены в зависимость нормированной интенсивности ЭЛ от энергии квантов. Согласно работе [13], доминирующую роль в *c*-Si при не очень высоких концентрациях инжектированных в базу диода носителей заряда (при которых еще возможно существование свободных экситонов) в широком диапазоне температур, включая комнатную, обычно играет механизм излучательной рекомбинации через свободные экситоны. Поэтому основной причиной обусловленного ростом температуры уширения спектров в область более коротких длин волн (λ) можно полагать уширение распределения Максвелла свободных экситонов по их кинетическим энергиям. Кроме того, поскольку скорость излучательной рекомбинации через экситоны (R) описывается выражением

$$R(\lambda) = n_{\text{ex}}(\lambda)/\tau_{\text{ex}}(\lambda), \quad (1)$$

где $n_{\text{ex}}(\lambda)$ и $\tau_{\text{ex}}(\lambda)$ — соответственно концентрация и излучательное время жизни экситонов, излучающих на длине волны λ , определенный вклад в рассматриваемое

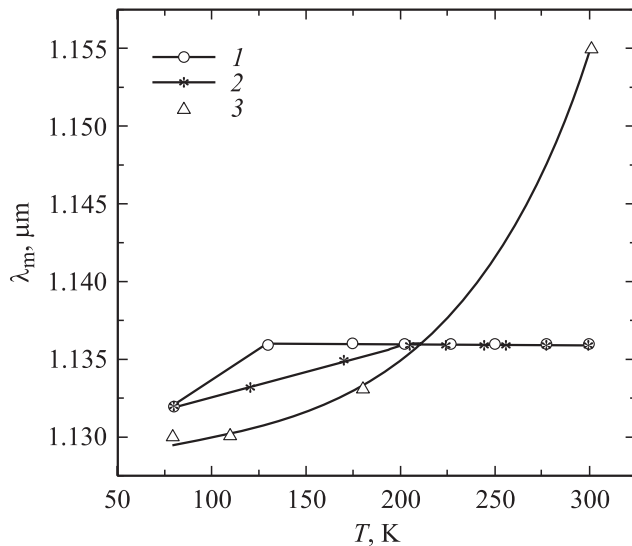


Рис. 3. Зависимости длины волны (λ_m), соответствующей максимуму распределения по длинам волн интенсивности ЭЛ, от температуры. 1 — по результатам, представленным на рис. 1; 2 — по результатам работы [9]; 3 — по результатам работы [21].

уширение может вносить изменение с ростом температуры функции $\tau_{ex}(\lambda)$ [20].

На рис. 3 (кривая 1) представлена построенная на основании рис. 1 зависимость длины волны (λ_m), соответствующей максимуму распределения по длинам волн интенсивности ЭЛ, от температуры. Как видно, в диапазоне температур 130–300 К величина λ_m не зависит от температуры. Ранее подобный эффект, но в значительно более узком температурном интервале (см. кривую 2 на рис. 2), наблюдался в работе [9] в плоскостном Si-светодиоде. На рис. 2 для сравнения также представлена опубликованная в [9] зависимость λ_m от температуры для спектров ЭЛ из работы [21]. В результате проведенных в [9] исследований было показано, что такое большое различие кривых 2 и 3 обусловлено интерференционными явлениями в пленке SiO_2 , через которую осуществлялся вывод краевой ЭЛ из кремния в работе [9]. Как отмечено выше, в настоящей работе вывод излучения осуществлялся также через пленку диоксида кремния. Таким образом, полученные нами результаты показывают, что подбор оптимальных параметров диэлектрической пленки, через которую краевое излучение выводится из светодиода, позволяет обеспечить стабильность λ_m в еще значительно более широком диапазоне температур, чем достигнутый ранее в [9]. В соответствии с объяснением этого эффекта, представленным в [9], нанесение диэлектрических покрытий с определенными свойствами может быть использовано для повышения температурной стабильности λ_m и в других светодиодах, в том числе на основе прямозонных полупроводников. Полученные результаты также показывают, что идентификация спектров люминесценции

и определение температуры образца по положению максимума люминесценции не всегда могут быть корректными, поскольку положение максимума зависит от условий выхода излучения.

При температуре 80 К нами были исследованы спектры ЭЛ для различных токов, вплоть до 2 А. При токах около 0.07 А и менее зависимости формы спектра от тока в пределах погрешности экспериментов не наблюдалось. На рис. 4 приведены нормированные на интенсивность ЭЛ в максимуме спектры ЭЛ при трех величинах тока. При токах, больших чем 70 мА, наблюдается уширение спектров как в сторону длинных, так и коротких длин волн. Как следует из рис. 1 и 2 и литературных данных, такой характер уширения может быть связан как с разогревом образца протекающим током, так и с изменением механизма ЭЛ. В частности, согласно [22], при достаточно высоких концентрациях экситонов существование свободных экситонов становится невозможным, и краевое излучение обусловлено излучательной рекомбинацией в электронно-дырочной плазме. Описанный в работе [22] характер изменений спектров, обусловленный изменением механизма катодолюминесценции *c*-Si при росте тока, аналогичен представленным на рис. 4. Для определения влияния указанных возможных причин уширения спектров на работу исследованного диода на рис. 5 построены зависимости от тока величины δE , определение которой (с тем отличием, что в данном случае изменение энергии соответствующих квантов происходило в результате изменения тока, а не температуры медного основания, на которое помещался образец) дано выше. При линейной шкале по вертикальной оси и логарифмической по горизонтальной зависимости δE от тока, начиная с ~ 0.07 А, линейная (рис. 5). Соответственно в линейных координатах эта зависимость сублинейна в отличие от представленной на рис. 2 сверхлинейной. Поскольку зависимость температуры от тока диода, согласно теоретическим оцен-

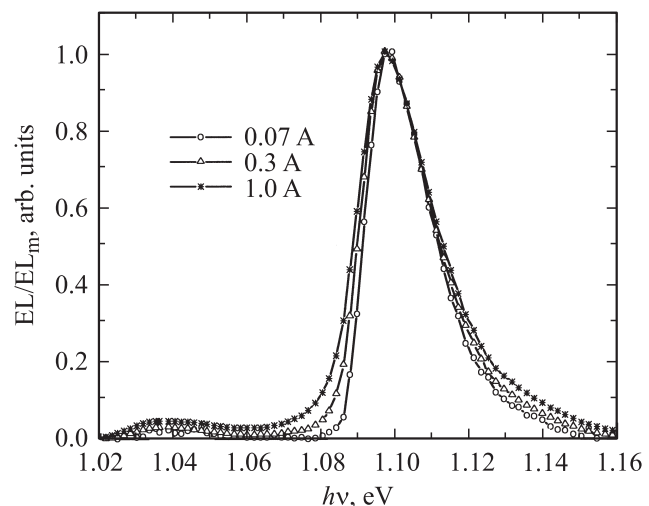


Рис. 4. Нормированные на интенсивность ЭЛ в максимуме спектры ЭЛ светодиода при трех величинах тока.

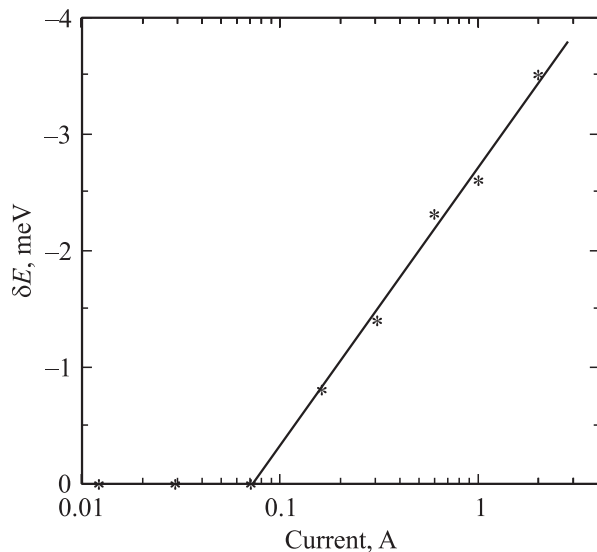


Рис. 5. Зависимости от тока величины δE светодиода при 80 К.

кам [23], сверхлинейна (квадратичная), сравнение кривых на рис. 2 и 5 показывает, что основные изменения спектров с ростом тока не связаны с разогревом образца (зависимости δE от температуры, δE от тока и тем более от квадрата тока имеют различный характер). Такие представления подтверждаются использованными нами малой длительностью и высокой скважностью импульсов тока, хорошими условиями теплоотвода. Линейные (начиная с определенных порогов) зависимости величин δE от интенсивности возбуждения краевой люминесценции *c*-Si в линейных по вертикальной и логарифмических по горизонтальной оси координатах для температур 25–70 К наблюдались в работе [24]. Авторы [24] связали такое уширение спектров люминесценции с формированием из газа свободных экситонов электронно-дырочной плазмы в результате перехода Мотта. Поэтому и в исследованном точечном светодиоде уширение спектров можно объяснить образованием электронно-дырочной плазмы. Поскольку распределение экситонов и носителей заряда в базе точечного диода весьма неоднородно как по толщине, так и по площади полупроводниковой пластины, об изменениях механизма излучательной рекомбинации можно говорить только для определенной части излучающей области базы точечного светодиода.

Зависимость интегральной мощности краевой ЭЛ исследованного диода от плотности тока через *p*–*n*-переход представлена кривой 1 на рис. 6. Качественно она подобна измеренной при 300 К [17]: после начального нелинейного участка эта зависимость линейна, после чего наблюдается сублинейный участок. Но отклонения от линейности на этом участке при одинаковых плотностях тока значительно меньше, чем при 300 К. В результате слабо изменяющийся участок зависимости квантовой эффективности от плотности тока простира-

ется вплоть до очень высоких плотностей тока 25 кА/см² (см. кривую 2 на рис. 6). Сублинейный участок зависимости интенсивности ЭЛ от тока и уменьшение квантовой эффективности обычно связаны с включением механизма оже-рекомбинации в дополнение к механизму Шокли–Рида–Холла [17,3,4]. Таким образом, полученные результаты показывают, что по меньшей мере вплоть до плотностей тока ~ 25 кА/см² при 80 К проявление оже-рекомбинации малозначительно. Это обусловлено в значительной мере тем, что с понижением температуры относительно комнатной скорость безызлучательной рекомбинации в *c*-Si возрастает [9,15] и соответственно при фиксированной плотности тока суммарная концентрация свободных носителей и экситонов уменьшается. Кроме того, на степень проявления оже-рекомбинации может оказывать влияние зависимость от температуры коэффициента оже-рекомбинации, изменение механизма ЭЛ с ростом тока. Несмотря на более высокую скорость безызлучательной рекомбинации при 80 К, интенсивность ЭЛ и квантовая эффективность при этой температуре и плотности тока 25 кА/см² были выше, чем при 300 К. Это объясняется главным образом тем, что скорость излучательной рекомбинации при понижении температуры от 300 до 80 К возросла в большей пропорции, чем скорость безызлучательной рекомбинации. Отметим, что, если следовать теоретическим оценкам о связи внешней и внутренней квантовой эффективности для полупроводниковых светодиодов с показателем преломления $n \approx 3.6$, результаты которых приведены в работе [25], величины внутренней квантовой эффективности исследованного нами *c*-Si-светодиода примерно на 2 порядка больше, чем величины η_{ex} , представленные на рис. 6. Отметим, что одним из преимуществ точечных светодиодов по сравнению с плоскостными является то, что в них легче реализовать значительно

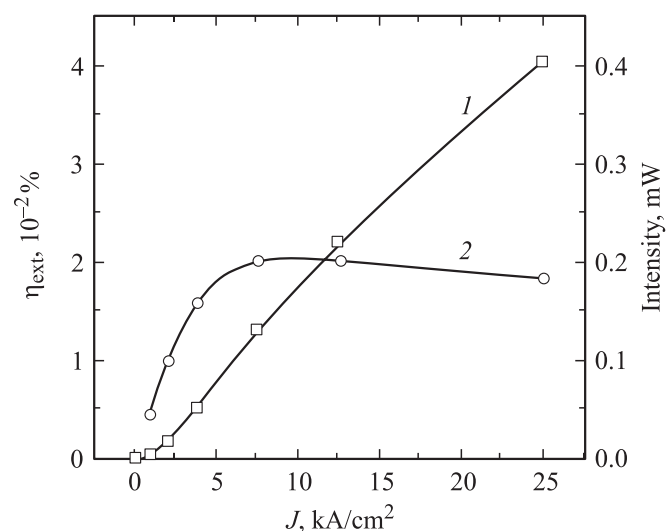


Рис. 6. Зависимости интегральной мощности (кривая 1) и внешней квантовой эффективности η_{ext} (кривая 2) краевой ЭЛ светодиода от плотности тока через *p*–*n*-переход при 80 К.

более эффективный по сравнению с описанным выше вывод краевого излучения из светодиода [25], который может позволить увеличить выходную мощность и η_{ext} описанного светодиода до нескольких десятков раз при тех же величинах плотности тока.

4. Заключение

В работе были исследованы спектральные характеристики, излучаемая мощность и квантовая эффективность в области межзонных переходов эффективного точечного светодиода при температурах 80–300 К. Малая площадь p – n -перехода позволила получать плотности тока до 25 кА/см². Достигнута рекордная температурная стабильность положения максимума спектральных зависимостей. При 80 К наблюдалось уширение спектров ЭЛ при росте тока, которое интерпретировано как обусловленное изменением механизма ЭЛ (появлением рекомбинационного излучения электронно-дырочной плазмы) в части излучающего объема базы диода. В исследованном диоде при 80 К вплоть до самых высоких плотностей тока проявление влияния оже-рекомбинации на зависимости интенсивности ЭЛ и квантовой эффективности от тока было малозначительным.

Автор выражает благодарность В.Л. Суханову за изготовление образцов и Н.А. Соболеву за предоставленную возможность проведения люминесцентных измерений.

Работа частично поддержана РФФИ (грант № 04-02-16935).

Список литературы

- [1] M.A. Green, J. Zhao, A. Wang, P.J. Reece, M. Gal. *Nature*, **412**, 805 (2001).
- [2] Th. Trupke, J. Zhao, A. Wang, R. Corkish, M.A. Green. *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 2996 (2003).
- [3] А.М. Емельянов, Н.А. Соболев. *ФТП*, **42**, 336 (2008).
- [4] А.М. Емельянов, Н.А. Соболев. *ПЖТФ*, **34** (4), 64 (2008).
- [5] R.A. Bardos, T. Trupke, M.C. Schubert, T. Roth. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 053 504 (2006).
- [6] M.D. Abbott, J.E. Cotter, F.W. Chen, T. Trupke, R.A. Bardos, K.C. Fisher. *J. Appl. Phys.*, **100**, 114 514 (2006).
- [7] M.D. Abbott, J.E. Cotter, T. Trupke, R.A. Bardos. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 114 105 (2006).
- [8] T. Trupke, R.A. Bardos, M.C. Schubert, W. Warta. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 044 107 (2006).
- [9] А.М. Емельянов, Н.А. Соболев, Т.М. Мельникова, S. Pizzini. *ФТП*, **37**, 756 (2003).
- [10] А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев, Н.А. Соболев, Т.М. Мельникова. *ФТП*, **38**, 634 (2004).
- [11] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Е.И. Шек, В.И. Вдовин. *ФТТ*, **46**, 39 (2004).
- [12] А.М. Емельянов, Н.А. Соболев, Е.И. Шек. *ФТТ*, **46**, 44 (2004).
- [13] А.М. Емельянов. *Письма ЖТФ*, **30** (22), 75 (2004).
- [14] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, E.I. Shek, V.I. Vdovin. *Sol. St. Phenomena*, **95–96**, 283 (2004).

- [15] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, E.I. Shek, V.I. Vdovin. *Physica B*. **340–342**, 1031 (2003).
- [16] Ю.П. Носов. *Физические основы работы полупроводникового диода в импульсном режиме* (М., Наука, 1968) гл. 4, с. 150.
- [17] А.М. Емельянов, В.В. Забродский, Н.В. Забродская, Н.А. Соболев, В.Л. Суханов. *ФТП*, **40**, 882 (2006).
- [18] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, В.В. Забродский, Н.В. Забродская, В.Л. Суханов, Е.И. Шек. *ФТП*, **41**, 635 (2007).
- [19] W. Bludau, A. Onton, W. Heinke. *J. Appl. Phys.*, **45**, 1846 (1974).
- [20] J.R. Haynes, M. Lax, W.F. Flood. *J. Phys. Chem. Sol.*, **8**, 392 (1959).
- [21] Wai Lek Ng, M.A. Lourenco, R.M. Gwilliam, S. Ledain, G. Shao, K.P. Homemood. *Nature*, **410**, 192 (2001).
- [22] В.С. Вавилов, Э.Л. Нолле. *ФТП*, **2**, 742 (1968).
- [23] Н.Г. Рязцев. *Материалы квантовой электроники* (М., Сов. радио, 1972) гл. 7, с. 268.
- [24] Jagdeep Shah, M. Combescot, A.H. Dayem. *Phys. Rev. Lett.*, **38**, 1497 (1977).
- [25] А. Берг, П. Дин. *Светодиоды* (М., Мир, 1979) гл. 6, с. 586.

Редактор Л.В. Беляков

Near-band-gap electroluminescence of the effective dot silicon light-emitting diode in the region of temperatures 80–300 K

A.M. Emel'yanov

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

Abstract In the region of temperatures 80–300 K the spectrums of near-band-edge electroluminescence of the dot silicon light-emitting diodes with an area of p – n -junction 0.008 mm² are measured. Record stability of position of a spectrum maximum is detected at temperatures 130–300 K. At 80 K the investigations of spectral characteristics of light-emitting diodes carried out at various current density up to 25 kA/cm². As against to earlier described results of investigations at 300 K, at temperature 80 K it was not observed the considerable decrease of quantum efficiency caused by developing process of Auger recombination. The analysis of spectrums of electroluminescence at 80 K in a wide band of currents show that the mechanism of radiation recombination of the free excitons is not determining at all explored currents in all radiating area of base of the dot light-emitting diode.