

06.2; 06.3; 07

© 1992

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНИЙ СВЕТОДИОД

В. А. Д м и т р и е в, И. Ю. Л и н ь к о в,
Я. В. М о р о з е н к о, В. Е. Ч е л н о к о в

В последнее время электронная промышленность проявляет повышенный интерес к оптоэлектронным устройствам, работающим при высоких температурах. Сообщалось о создании фототранзистора на основе *GaAs*, способного работать при температуре 250°C [1]; высокотемпературного ультрафиолетового фотоприемника [2, 3]; высокотемпературного синего светодиода на базе *SiC-6H* [4].

Высокотемпературные светодиоды могут найти применение в качестве миниатюрных источников коротковолнового излучения в горячих кюветах газовых анализаторов, а также жидкостных и газовых хроматографов, в качестве элементов высокотемпературных оптопар и термостабильных опорных источников света.

Известно, что при повышенной температуре примесная люминесценция в *SiC* тушится. В то же время интенсивность коротковолновой фотолюминесценции карбида кремния в сине-фиолетовой области спектра заметно увеличивается при повышении температуры от комнатной до 900 К [5]. Существование эффективной люминесценции при высоких температурах позволило создать синий светодиод на основе *SiC-6H* с рабочей температурой 500°C.

1. В ы р а щ и в а н и е э п и т а к с и а л ь н ы х
с т р у к т у р *SiC-6H*

Эпитаксиальные структуры *SiC-6H* выращивались методом бесконтейнерной жидкостной эпитаксии из раствора-расплава *Si-C* [6]. В качестве подложек использовались монокристаллы *SiC-6H* *p*-типа, изготовленные методом Лепи. Слои легировались азотом (донор) и алюминием (акцептор).

Светодиодные *p-n* структуры выращивались в едином эпитаксиальном процессе на *Si*-границе; вначале из раствора-расплава, содержащего алюминий, выращивался *p*-слой, затем в камеру роста напускался газообразный азот и за счет перекомпенсации проводимости рос слой *n*-типа. Как к *p*-, так и к *p*-слою напылялись алюминиевые контакты. Свет выводился со стороны *n*-слоя. Светодиодная *p-n* структура закреплялась на металлическом корпусе с помощью прижимных электродов.

2. С о п о с т а в л е н и е в ы с о к о т е м п е р а -
т у р н о й ф о т о - и э л е к т р о л ю м и н е с -
ц е н ц и и

Электролюминесценция *SiC-6H* при температурах выше 350 К ранее практически не исследовалась. С целью интерпретации спек-

ров электролюминесценции (ЭЛ) высокотемпературного светодиода была сопоставлена ЭЛ р-п структур и фотолюминесценции (ФЛ) эпитаксиальных слоев (ЭС). Исследовались эпитаксиальные слои с различными концентрациями азота и алюминия и различной степенью компенсации. Концентрация азота менялась от $1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ до $3.0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а до $3.0 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ алюминия — от минимальной (легирование Al не производилось) до $1.0 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Фотолюминесценция возбуждалась импульсным азотным лазером с энергией квантов 3.68 эВ.

При низкой температуре спектры ФЛ слабокомпенсированных слоев п- и р-типа имеют вид, характерный для люминесценции донорно-акцепторных пар [7]; в то же время, в компенсированных ЭС спектры ФЛ претерпевают изменения. Одним из проявлений компенсации является сдвиг в длинноволновую область полосы донорно-акцепторной люминесценции в парах N-Al и люминесценции свободных экситонов. В максимально компенсированных эпитаксиальных слоях SiC-6H сдвиг максимума донорно-акцепторной полосы составляет 120 мэВ, а экситонной — 35 мэВ по сравнению с некомпенсированными слоями п-типа [5]. При температуре $T \sim 150 \text{ K}$ форма спектра ЭЛ р-п структур близка к контуру ФЛ сильнокомпенсированных ЭС (рис. 1б). Таким образом, при низкой температуре ЭЛ возникает в основном в сильнокомпенсированной области р-п структуры.

При высокой температуре спектры ЭЛ р-п структур отличаются от спектров ФЛ всех исследованных ЭС. При $T > 700 \text{ K}$ в спектре ЭЛ (рис. 1, а) можно выделить две полосы люминесценции — коротковолновую ($\lambda_{max} = 440 \text{ нм}$) и длинноволновую ($\lambda_{max} = 480 \text{ нм}$), в то время как в спектре ФЛ проявляется лишь полоса люминесценции свободного экситона ($\lambda_{max} = 440 \text{ нм}$ при $T = 800 \text{ K}$ [5]). Спектр ЭЛ имеет значительно большую полуширину, чем спектр ФЛ, а центр тяжести полосы ЭЛ сдвинут в длинноволновую область. Сравнение спектров ЭЛ и ФЛ показывает, что энергетическое положение максимума и форма коротковолнового крыла коротковолновой полосы ЭЛ такие же, как у полосы ФЛ свободных экситонов в слабокомпенсированных ЭС п-типа. В то же время полоса экситонной ФЛ компенсированных слоев значительно хуже описывает коротковолновое крыло спектра ЭЛ (поскольку в компенсированных слоях экситонная полоса ФЛ смещена в длинноволновую область). Поэтому мы аппроксимировали коротковолновую часть спектра ЭЛ при $T = 800 \text{ K}$ полосой ФЛ свободных экситонов в слабокомпенсированных слоях п-типа. При вычитании контура ФЛ из контура ЭЛ остается полоса с энергией максимума $\lambda_{max} = 480 \text{ нм}$. Если отметить эту полосу по энергии в коротковолновую область на величину изменения запрещенной зоны при уменьшении температуры от 800 K до 100 K, то контур смещенной полосы оказывается близким к контуру полосы донорно-акцепторной люминесценции.

Итак, спектр электролюминесценции при высокой температуре состоит из примерно равных по интенсивности полос: экситонной и донорно-акцепторной; светоизлучающая область включает слабокомпенсированный слой п-типа.

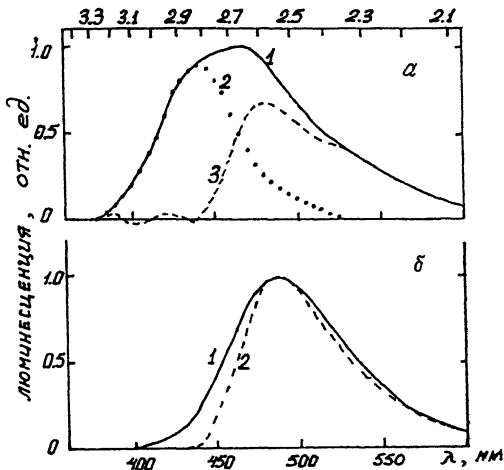


Рис. 1. Сопоставление спектров фото- и электролюминесценции. а) Спектры при $T=800$ К: 1 - электролюминесценция р-п структуры (ток 20 мА); 2 - фотолуминесценция слабокомпенсированного ЭС п- типа; 3 - разность контуров ЭЛ и ФЛ. б) Спектры при низкой температуре: 1 - электролюминесценция р-п структуры при $T=170$ К (ток 20 мА); 2 - фотолуминесценция сильнокомпенсированного ЭС при $T=130$ К.

3. Параметры и характеристики высокотемпературного светодиода

Исследования характеристик светодиода проводились в интервале температур 170–800 К как на постоянном токе, так и на импульсах для предотвращения разогрева образца.

Вольт-амперная характеристика светодиода (рис. 2) при высоких температурах (420–800 К) линейна при $U > E_g/q$ (q - заряд электрона). Остаточное дифференциальное сопротивление структуры ~ 50 Ом при токе 20 мА и температуре 800 К.

Длина волны максимума спектра электролюминесценции λ_{max} при комнатной температуре равна 485 нм ($h\nu_{max}=2.56$ эВ); с увеличением температуры до 800 К спектр смещается в коротковолновую область и при $T=800$ $\lambda_{max}=465$ нм ($h\nu_{max}=2.67$ эВ). Полуширина спектра $\Delta\lambda$ при изменении температуры от 300 К до 800 К увеличивается от 85 нм до 105 нм (рис. 3, а). Визуальное восприятие цвета свечения в интервале температур от 170 К до 800 К - синее. Характеристика поток фотонов-ток, снятая на импульсах, сублинейной при $T=300$ К и сверхлинейна при $T=800$ К. Увеличение температуры не приводит к существенному снижению работоспособности светодиода. Для светодиода с квантовым выходом

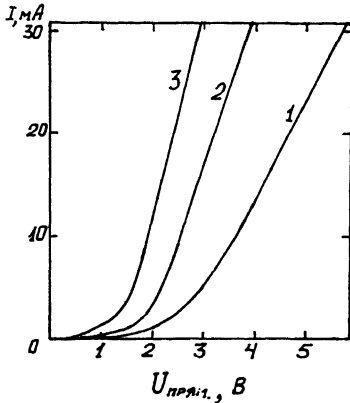


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики светодиода; Т, К: 1 - 420, 2 - 590, 3 - 800.

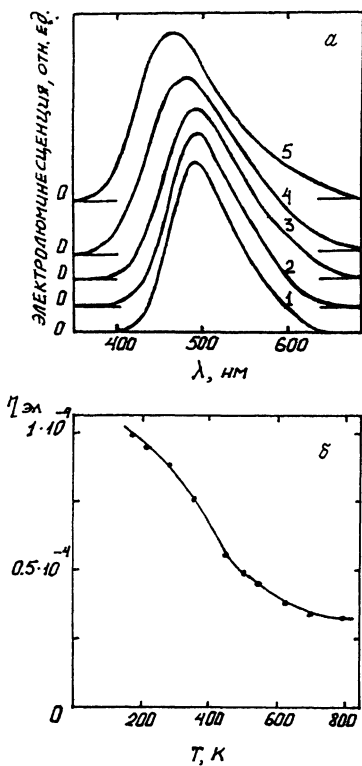


Рис. 3. Электролюминесцентные характеристики светодиода. а) Спектры электролюминесценции при токе 20 мА; Т, К: 1 - 170, 2 - 290, 3 - 360, 4 - 620, 5 - 800. б) Температурная зависимость внешнего квантового выхода электролюминесценции.

электр люминесценции при комнатной температуре 0.01% и мощностью излучения 2.5 мкВт увеличение температуры до 800 К приводит к уменьшению квантового выхода примерно в 2.5 раза (рис. 3, 6). При $T=800$ К и $I=20$ мА мощность излучения равна 1 мкВт. Температурный коэффициент мощности излучения в области температур 600К–800К составляет -0.1% на градус.

Создание синих светодиодов с рабочей температурой 500°C и малым температурным коэффициентом мощности излучения заметно расширяет область практического применения оптоэлектроники.

Авторы благодарны А. Е. Черенкову за помощь в работе и полезные обсуждения, а также И. Д. Коваленко и Т. П. Самсоновой за техническое содействие.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] G r z y b o w s k i R.R. // В Transactions of I International High Temperature Electronics Conference p. 59, Albuquerque, U.S.A. 1991.
- [2] B r o w n D.M., E d m o n d J., D a s g u p t a S. и др. // В Transactions of I International High Temperature Electronics Conference, p. 214, Albuquerque, U.S.A. 1991.
- [3] G l a s o w P., Z i e g l e r G., S u t t r o p W. и др. // SPIE. 1987. V. 868. P. 40.
- [4] D m i t r i e v V.A., L i n k o v I.Yu., M o r o z e n k o Ya.V., C h e l n o k o v V.E., C h e r e n k o v A.E. // В Proceedings of I International High Temperature Electronics Conference p. 506, Albuquerque U.S.A. 1991.
- [5] Е в с т р о п о в В.В., Л и н ь к о в И.Ю., М о р о з е н к о Я.В., П и к у с Ф.Г. // ФТП. 1992. Т. 26.
- [6] Д м и т р и е в В.А., И в а н о в П.А., М о р о з е н к о Я.В., П о п о в И.В., Ч е л н о к о в В.Е. // Письма ЖТФ. 1985. Т. 12. С. 240.
- [7] I k e d a M., H a y a k a w a T., Y a m a g i w a S., M a t s u n a m i H., T a n a k a T. // J. Appl. Phys. 1979. V. 50. N 2. P. 8215.

Физико-технический
институт им. А. Ф. Иоффе
С.-Петербург

Поступило в Редакцию
14 января 1992 г.