

06.2; 06.3; 07

©1993

## ГОЛУБЫЕ SiC-6H СВЕТОДИОДЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ СУБЛИМАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

*Ю.А.Водаков, А.А.Вольфсон, Г.В.Зарицкий, Е.Н.Могов,  
А.Г.Остроумов, Е.Н.Потапов, А.Д.Роевков, В.В.Семенов,  
В.И.Соколов, В.А.Сыралева, В.Е.Удальцов*

Полупроводниковые источники света, излучающие в голубой области спектра, в последнее время привлекают к себе большое внимание [1]. Наиболее подходящими материалами для создания голубых светодиодов (СИД) являются GaN, ZnSe, SiC. Карбид кремния оказывается более предпочтительным, прежде всего потому, что он легко может быть получен как электронного, так и дырочного типов проводимости. Структура голубых СИД на базе SiC с максимумом спектра люминесценции 465–480 нм в основном формировали методом жидкостной эпитаксии в графитовых тиглях [2,3], либо бесконтейнерной жидкостной эпитаксией [4], используя в качестве растворителя расплав кремния, а активаторами электролюминесценции азот и алюминий.

Например, фирма Sanyo El. изготовила SiC-СИД в пластмассовом корпусе с выходной мощностью 1.7 мВт, силой света 12 при полуширине диаграммы направленности 16°, рабочем токе 20 мА и падении напряжения 3.5 В [5]. Однако производство структур SiC-СИД методом жидкостной эпитаксии связано с рядом проблем, среди которых отметим необходимость использования в качестве контейнерного материала вакуумно плотного графита полупроводниковой чистоты. Кроме того, жидкофазной эпитаксией достаточно сложно вырастить качественные слои SiC, не содержащие включений других политипов, что ведет к значительному разбросу параметров СИД, выращенных на одной подложке и снижает выход годных структур.

Для крупномасштабного производства голубых SiC-СИД очевидно более перспективными являются методы газофазного осаждения, в частности, сублимационный “сэндвич-метод” [6]. В нем рост эпитаксиальных слоев ведется одновременно на большом числе подложек, находящихся практически в идентичных условиях. Метод обеспечивает выращивание слоев SiC с контролируемым уровнем легирования различными примесями [7]. Он позволяет уверенно выращивать не только слои политипа 6H, но и других политипов, например 4H на подложках 6H [8], на базе которых получены фиолетовые СИД [9].

В голубых SiC-СИД активаторами люминесценции, как правило, являются акцепторные примеси Al [2–5] или Ga [10,11], несколько отличающиеся по энергии активации ( $\Delta E \approx 0.27$  эВ для Al и 0.35 эВ для Ga в 6H-SiC). Однако применение Ga при сублимационном росте имеет ряд преимуществ. Так, люминофор SiC(Ga, N) при температуре, близкой к комнатной, обладает более интенсив-

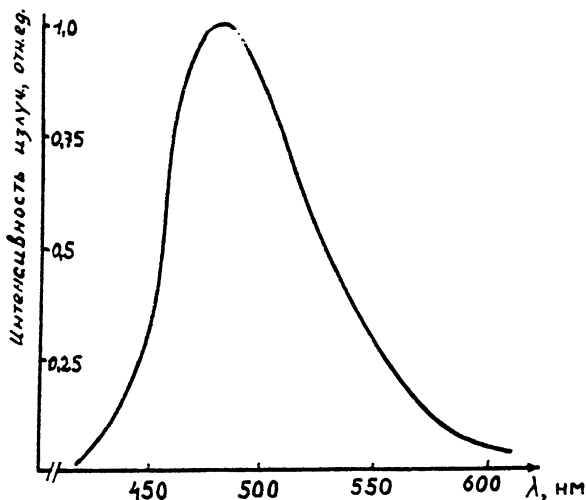


Рис. 1. Спектр электролюминесценции светодиода при 300 К.

ной фотолюминесценцией и меньшей энергией активации температурного тушения, чем  $\text{SiC}(\text{Al}, \text{N})$  [11]. Галлий значительно менее агрессивен, чем алюминий, практически не взаимодействует с материалом контейнера и не вносит загрязнений в реактивную зону.

В отличие от других способов роста при использовании сублимационного "сэндвич-метода" концентрация Ga может быть легко доведена до  $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , что вполне достаточно для создания высокой плотности донорно-акцепторных пар Ga-N, ответственных за излучательную рекомбинацию. Следует отметить возможность создания голубых СИД имплантацией ионов алюминия в слой  $n$ -типа проводимости политипа  $4H\text{-SiC}$  с последующим отжигом [12].

Наращивание эпитаксиальных слоев  $6H\text{-SiC}$  проводилось в вакуумных нагревательных установках в среде аргона. В качестве подложек использовались монокристаллические пластины  $\text{SiC-}6H$   $n$ -типа проводимости, ориентированные поверхностями, близкими к  $\{0001\}$ . Вначале на подложках наращивался слой  $n\text{-SiC}$ , легированный Ga и N, затем слой  $p$ -типа проводимости, легированный Al. Концентрация Ga в слоях регулировалась путем изменения температуры источника Ga и составляла  $(1-8) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Содержание азота в  $n$ -слое задавалось величиной парциального давления  $\text{N}_2$ , вводимого в зону роста, и варьировалось в пределах  $(1.5-10) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Концентрация в  $p$ -слое  $(N_A - N_D)$  достигла  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

После наращивания  $p$ - $n$  перехода на поверхность напылялся Al, который обеспечивал омический контакт к  $p$ -слою и служил маской при изготовлении мезаструктур с диаметром контак-

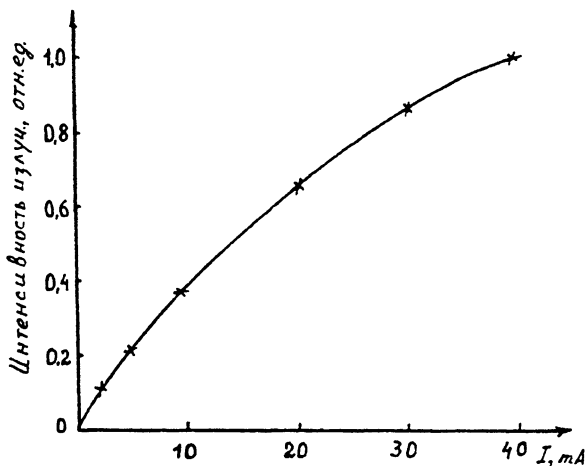


Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения светодиода от силы тока через  $p-n$  переход при 300 К.

та 350 мкм. Никелиевые контакты к  $n$ -области диаметром 150 мкм создавались путем вакуумного напыления. Далее кристаллы подрезались на отдельные типы размером  $500 \times 500$  мкм. Защита периферии  $p-n$  перехода выполнялась слоем диэлектрика  $\text{SiO}_2$ , либо  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , либо  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 0.2–0.3 мкм. Для снижения рабочих напряжений  $n$ -область могла предварительно легироваться имплантацией ионов азота.

Сборка СИД проводилась по промышленной технологии в корпусе типа  $TO_1$ , посадкой типа  $p$ -стороной к основанию держателя с применением электропроводящего слоя и герметизацией специально очищенным эпоксидным компаундом. Изготовленные СИД имели полуширину диаграммы направленности  $15 \pm 1^\circ$ .

Спектр электролюминесценции СИД приведен на рис. 1. Максимум излучения приходится на длины волн  $480 \pm 5$  нм, ширина спектра на уровне  $0.5I$  составляет 75 нм. Электрические характеристики корпусированных СИД снимались в стационарном режиме при 300 К. Вольт-емкостные зависимости свидетельствуют о наличии резкого  $p-n$  перехода. Потенциал отсечки составлял 2.6–2.8 В. При рабочем токе 20 мА падение напряжения на СИД находится в пределах 2.6–3.1 В. Остаточное дифференциальное сопротивление равно 10–20 Ом.

Зависимость интенсивности излучения от тока через СИД представлена на рис. 2. Сила света сублинейно возрастает с током и при 20 мА у лучших образцов достигала 11 мкд, что сравнимо со значениями, приводимыми в литературе [5]. Мощность излучения СИД с увеличением температуры падает, при этом сохраняется линейная зависимость. При  $100^\circ\text{C}$  мощность излучения падает по сравнению с комнатной температурой в 1.7 раза.

Полученные СИД характеризуются высоким быстродействием. Время срабатывания не превышает 30 нс, что существенно превосходит быстродействие СИД на основе SiC(Al, N) [2,4].

Использование сублимационного "сэндвич-метода" обеспечивает высокий выход годных структур (~90%). Разброс параметров СИД, полученных с одной пластины, не превышает 20%.

Таким образом, представленные результаты демонстрируют возможность промышленного производства голубых светодиодов с  $\lambda_{\max} = 480$  нм методом сублимационной эпитаксии.

В заключение авторы выражают благодарность А.О.Константинову, А.А.Лепневой, А.В.Наумову, А.Г.Рамму за помощь в проведении экспериментов.

#### Список литературы

- [1] *Katsunide M.* // *Optronics*. 1991. V. 10. N 7. P. 128–134.
- [2] *Hoffman L., Ziegler G., Theis D., Weyrich G.* // *J. Appl. Phys.* 1982. V. 53. N 10. P. 6962–6967.
- [3] *Nakata T., Koga K., Matsushita Y., Heda Y., Niina T.* // *Springer Proc. in Physics*. 1989. V. 43. P. 26–34.
- [4] *Вишневская Б.И., Дмитриев В.А., Коваленко И.Д., Коган Л.М., Морозенко Я.В., Родкин В.С., Сыркин А.Л., Царенков Б.В., Челноков В.Е.* // *ФТП*. 1988. Т. 22. Вып. 4. С. 664–669.
- [5] *Экспресс-информация по зарубежной электронной технике // Оптоэлектроника (светоизлучающие приборы)*. 1989. Вып. 176. С. 4831.
- [6] *Vodakov Yu.A., Mokhov E.N., Ramt M.G., Roenkov A.D.* // *Krist. und Techn.* 1979. V. 14. N 6. P. 729–741.
- [7] *Могов Е.Н., Махмудов Б.С., Усманова Н.М., Юлдашев Г.Ф.* // *Письма в ЖТФ*. 1982. Т. 8. Вып. 6. С. 377–380.
- [8] *Могов Е.Н., Рамм М.Г., Роенков А.Д., Водаков Ю.А., Ломакина Г.А., Веренчикова Р.Г.* // *Техника средств связи. Сер. Общетеχνическая*. 1982. Вып. 5. С. 28–36.
- [9] *Водаков Ю.А., Могов Е.Н., Роенков А.Д., Семенов В.В., Соколов В.И.* // *Письма в ЖТФ*. 1990. Т. 16. Вып. 14. С. 19–22.
- [10] *Водаков Ю.А., Могов Е.Н., Роенков А.Д., Семенов В.В., Веренчикова Р.Г., Константинов А.О., Одинг В.Г.* // *Письма в ЖТФ*. 1990. Т. 16. Вып. 14. С. 25–30.
- [11] *Иванов А.И., Могов Е.Н., Одинг В.Г., Вавилов В.С., Водаков Ю.А., Чукичев М.В.* // *Письма в ЖТФ*. 1989. Т. 15. Вып. 17. С. 38–41.
- [12] *Могов Е.Н., Роенков А.Д., Рамм М.Г., Кольцова Е.Н., Мальцев А.А., Бараш А.С., Гуле Е.Г., Демаков К.Д., Ломакина Г.А., Семенов В.В., Федоренко А.П.* // *Тез. докл. III Всес. совещ. "Физика и технология широкозонных полупроводников"*. Махачкала, 1986. С. 67.

Поступило в Редакцию  
11 июня 1993 г.