

ЭФФЕКТИВНЫЕ ЗЕЛЕННЫЕ СВЕТОДИОДЫ НА КАРБИДЕ КРЕМНИЯ

Водаков Ю. А., Вольфсон А. А., Зарицкий Г. В.,
Мохов Е. Н., Остроумов А. Г., Роевков А. Д.,
Семенов В. В., Соколов В. И., Сыралев В. А., Удальцов В. Е.

С использованием методики, включающей в себя газофазную сублимационную эпитаксию и ионную имплантацию алюминия, получены на основе карбида кремния политипа 6H светодиоды с чисто зеленым излучением ($\lambda_{\max} = 530$ нм). Приводятся электрические и люминесцентные характеристики светодиодов, свидетельствующие об их высокой эффективности. Сила света при рабочем токе 20 мА достигает 45 мкд при полуширине диаграммы направленности 16° . Мощность излучения составляет 5—15 мкВт. Светодиоды имеют сравнительно низкую инверсионность ($\tau < 100$ нс) и отличаются повышенной стабильностью и эксплуатационной надежностью.

Карбид кремния (SiC) является перспективным материалом для получения зеленых светоизлучающих диодов (СИД). В отличие от широко распространенных и освоенных промышленностью СИД на основе GaP с максимумом излучения $\lambda_{\max} > 555$ нм [1] на SiC (политипа 6H) возможно формирование СИД с более коротковолновым чисто зеленым излучением ($\lambda_{\max} = 530$ нм).

Эффективная электролюминесценция с максимумом излучения в зеленой области наблюдается в $p-n$ -структурах, полученных ионной имплантацией в 6H-SiC акцепторных примесей, в частности алюминия [2, 3]. Она связана с рекомбинацией экситона на центре, природа которого однозначно не установлена, хотя предполагается, что он является ассоциатом собственных дефектов [4]. Более подробные исследования показали, что интенсивность этой дефектной люминесценции, возникающей при облучении частицами высоких энергий, в том числе и за счет ионной имплантации, а также ее термическая стабильность, сильно зависят не только от условий облучения и термообработки, но и от отклонения от стехиометрии кристалла [5]. Это позволило сделать вывод о том, что в состав центра излучательной рекомбинации входит углеродная вакансия и, возможно, междоузельный кремний [6].

Известен еще ряд способов изготовления зеленых СИД на базе SiC. В [7] сообщалось о многоэлементных зеленых СИД, полученных диффузией бора в гетероэпитаксиальные слои 6H-SiC, выращенных на подложках 6H или 15R. В [8] приводятся параметры зеленых светодиодов, для создания которых использована бесконтейнерная жидкофазная эпитаксия.

В настоящей работе сообщается о параметрах промышленных зеленых СИД, изготовленных с использованием технологии газофазной эпитаксии и ионной имплантации.

Формирование структур СИД осуществлялось следующим образом. На подложках монокристаллического 6H-SiC с помощью сублимационного «сэндвич-метода» [9] выращивались слои 6H-SiC n -типа проводимости, легированные азотом, с концентрацией нескомпенсированных доноров $(N_D - N_A) = (0.7 \div 6) \times 10^{17}$ см $^{-3}$, толщиной 10—30 мкм. Рост эпитаксиальных слоев проводился при температуре 1700—1800 °С в вакууме $10^{-2} \div 10^{-3}$ Па на подложках, ориенти-

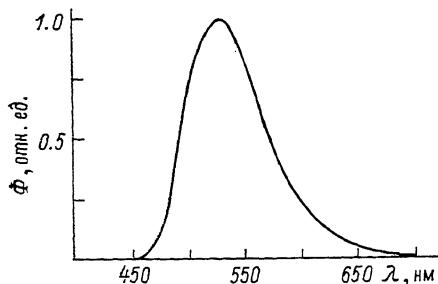


Рис. 1. Спектр излучения светодиода 6H-SiC.

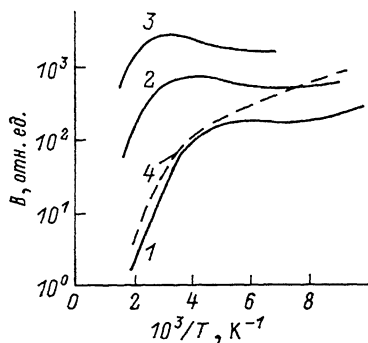


Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения светодиода от температуры при различных плотностях тока, mA/mm^2 .

1 — 10, 2 — 100, 3 — 1000, 4 — зависимость эффективности люминофора при плотности возбуждения катодолуминесценции $10 \text{ mA}/\text{mm}^2$.

рованных гранью (000 $\bar{1}$) C. Формирование $p-n$ -перехода осуществлялось за счет ионной имплантации алюминия, при которой одновременно вводились люминесцентно-активные центры. Энергия пучка ионов Al^+ составляла 90 кэВ, доза легирования $8 \cdot 10^3 \text{ мкКл}/\text{см}^2$. Для устранения радиационных нарушений и дополнительной активации внедренных акцепторов и люминесцентно-активных центров образцы после облучения отжигались в атмосфере инертного газа. Далее, к p -области диодных структур напылялись Al-контакты размерами $0.4 \times 0.4 \text{ мм}$, выполнявшие также роль маски при травлении меза-структур. Периферийная часть $p-n$ -перехода защищалась слоем SiO_2 . Затем на поверхность n -типа проводимости наносились металлические омические контакты диаметром 150 мкм. После резки пластины на отдельные чипы размерами $0.5 \times 0.5 \text{ мм}$ последние устанавливались с помощью электропроводящего клея на стандартные для СИД металлические рамки p -слоем вниз. Свет выводился через n -область и торцевые грани кристалла. Для вывода излучения в рамках имелся отражатель в форме усеченного конуса, предварительно покрытый слоем с хорошим отражением. Герметизация корпуса СИД осуществлялась очищенным оксидным компаундом, который заливался в полусферические полимерные формы.

Электрические и люминесцентные характеристики диодов измерялись как на готовых светодиодах, так и на незащищенных $p-n$ -структурах. Типичный спектр излучения СИД приведен на рис. 1. Отметим, что для различных СИД максимум излучения составлял $530 \pm 10 \text{ нм}$.

С увеличением тока через $p-n$ -переход от 10 до 500 мА максимум излучения незначительно (на $10 \div 15 \text{ нм}$) смещается в длинноволновую сторону. Это обусловлено тем, что при повышении тока происходит нагрев образца, ведущий к смещению всей полосы за счет температурного уменьшения ширины запрещенной зоны [10]. Кроме того, при высоких плотностях тока ($I \geq 100 \text{ мА}$) растет интенсивность длинноволновой полосы излучения. Мы это связываем с наличием в спектре двух сильно перекрывающихся полос с максимумами 510 и 540 нм. Относительная интенсивность этих полос зависит от технологических условий изготовления $p-n$ -перехода и тем самым определяет положение λ_{max} результирующего спектра.

Представляется важным то, что значение λ_{max} полученных СИД по величине составляет половину длины волны лазера на стекле с неодимом. В результате расширяется область применения таких СИД.

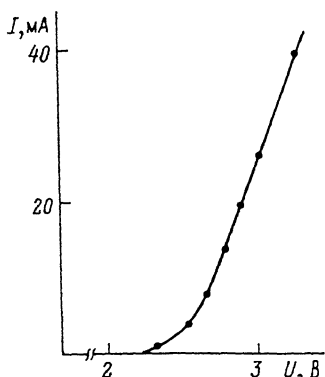


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика типичного светодиода ($T=300$ К).

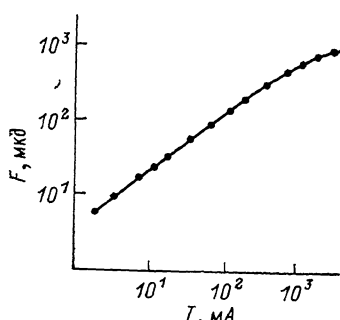


Рис. 4. Зависимость силы света от тока зеленого SiC-светодиода.

Полуширина спектра излучения равна 80 нм, т. е. существенно ниже, чем у СИД, приготовленных с помощью диффузии бора [7] или жидкостной эпитаксией [8].

Зависимость интенсивности излучения СИД от температуры при разных плотностях тока дана на рис. 2. Видно, что при температурах (T), выше комнатной, наблюдается экспоненциальный спад интенсивности излучения. Энергия активации температурного тушения люминесценции составляет $0.2 \div 0.3$ эВ. С увеличением уровня возбуждения начало участка температурного тушения смещается в сторону более высоких T . Уменьшение интенсивности электролюминесценции с понижением T можно объяснить за счет уменьшения коэффициента инжекции дырок вследствие более быстрого снижения их концентрации по сравнению с концентрацией электронов в n -области из-за различных энергий активации доноров (азота) и акцепторов (алюминия) [11]. Это подтверждается тем, что эффективность самого люминофора с понижением температуры непрерывно растет (рис. 2, кривая 4).

Вольт-амперная характеристика (прямая ветвь) СИД приведена на рис. 3. Эта зависимость $I(U)$ линейна при $U > 2.7$ В. Остаточное дифференциальное сопротивление $p-n$ -перехода находится в пределах $10 \div 15$ Ом и менее. Падение напряжения при $I \approx 20$ мА составляет $2.7 \div 2.9$ В. Заметим, что величина прямого падения напряжения значительно ниже, чем в известных в литературе

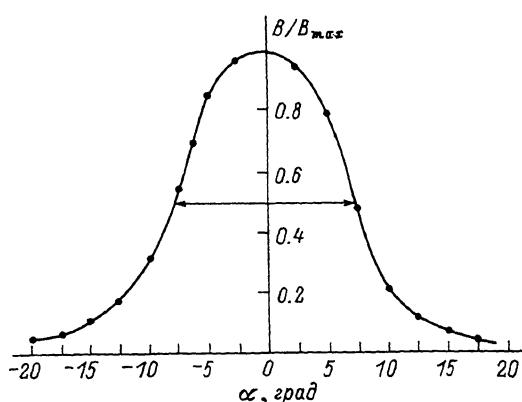


Рис. 5. Диаграмма направленности излучения светодиода.

СИД на базе SiC [8]. Это свидетельствует об отсутствии высокоомных прослоек в структурах $p-n$ -переходов, а также о высоком качестве омических контактов.

Типичная ток-яркостная характеристика СИД изображена на рис. 4. Измерения проводились на импульсах при $T=300$ К. Предварительно снималась диаграмма направленности излучения СИД (рис. 5), из которой определена ее ширина на уровне $0.5 \cdot I_{\max}$, составляющая 16° . При малых плотностях тока ток-яркостная характеристика описывается зависимостью $F \sim I^\alpha$, где $\alpha \approx 1$. Однако при больших токах ($I > 10^2$ мА) α снижается до величины $0.5 \div 0.7$. Отметим, что при рабочих токах $I=20$ мА зеленые СИД имеют яркость $20-45$ мкд и мощность излучения $5 \div 10$ мкВт, а лучшие СИД — до 15 мкВт. Это значительно выше, чем у известных из литературы параметров, аналогичных SiC-СИД [7, 8].

Изготовленные нами СИД имеют весьма высокое быстродействие. Время срабатывания СИД в режимах включения и выключения менее 100 нс.

Таким образом, сравнение параметров полученных нами зеленых СИД на базе SiC с аналогичными приборами, в том числе изготовленными на основе GaP, показывает ряд их достоинств. Они обладают наибольшей силой света среди известных до сих пор СИД на SiC, отличаются высокой стабильностью и эксплуатационной надежностью.

В заключение авторы выражают благодарность А. О. Константинову, А. А. Лепшевой, А. В. Наумову, Е. Н. Потапову, М. Г. Рамму за помощь в проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Берг А., Дин П. Светодиоды. М., 1979. 686 с.
- [2] Гусев В. М., Демаков К. Д., Касагонова М. Г., Рейфман М. Б., Столярова В. Г. // ФТП. 1975. Т. 9. В. 7. С. 1238—1245.
- [3] Мохов 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 техн. и широкозонных полупров.». Махачкала, 1986. С. 67.
- [4] Patrick L., Choyke W. J. // Phys. Rev. 1972. V. 58. N 8. P. 3253—3259.
- [5] Водаков Ю. А., Ломакина Г. А., Мохов Е. Н., Одинг В. Г., Соколов В. И. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 12. С. 2153—2158.
- [6] Водаков Ю. А., Ломакина Г. А., Мохов Е. Н., Одинг В. Г., Рамм М. Г., Соколов В. И. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 8. С. 1433—1437.
- [7] Бараш А. С., Водаков Ю. А., Кольцова Е. Н., Мальцев А. А., Мохов Е. Н., Роенков А. Д. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 24. С. 2222—2226.
- [8] Вишневская Б. И., Дмитриев В. А., Коган Л. М., Морозенко Я. В., Челноков В. Е., Черенков А. Е. // Письма ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 23. С. 56—59.
- [9] Vodakov Yu. A., Mokhov E. N., Ramm M. G., Roenkov A. D. // Krist. u. Techn. 1979. V. 14. N 6. P. 729—741.
- [10] Удальцов В. Е. // Изв. ЛЭТИ. Научн. тр. Ленингр. электротехн. института. 1980. Т. 280. С. 42—47.
- [11] Андреев А. П., Виолин Э. Е., Удальцов В. Е. // Изв. ЛЭТИ. Научн. тр. Ленингр. электротехн. института. 1982. Т. 302. С. 45—48.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе РАН

Санкт-Петербург

Производственное объединение «Планета»
Новгород

Получена 6.08.1991

Принята к печати 9.08.1991