

Достигнутое в рассматриваемом случае отношение $(с-ш)_{вх} = -20$ дБ существенно хуже теоретически возможного для АОКВИ данного типа, которое при исходных параметрах сигнала составляет -40 дБ [3]. Поскольку экспериментально установлено, что коммутация внешнего шума при отношении $(с-ш)_{вх} = -20$ дБ не влияет на выходной сигнал (рис. 2, в), следует предположить, что отмеченное несоответствие обусловлено факторами аппаратурного характера. К ним могут быть отнесены такие факторы, как нестабильность интенсивности излучения лазера, которая не корректируется в результате калибровки, ошибки квантования, связанные с недостаточным числом разрядов ЦАП (в эксперименте оно равнялось 6), а также собственные шумы ПЗС-фотоприемника.

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования в целом подтвердили работоспособность АОКВИ при решении задачи обнаружения видеосигнала на фоне шума и указали пути совершенствования данного устройства, способного найти эффективное применение в таких областях, как радиоастрономия, гидро- и оптическая локация.

Авторы признательны Я.Б. Вашкевичу за помощь в создании лабораторного макета.

Л и т е р а т у р а

- [1] Родес У.Т. - ТИИЭР, 1981, т. 69, № 1, с. 74-91.
- [2] Yamaguchi I., Uchida H., Saito H. - Jap. J. of Appl. Phys., 1983, v. 22, Suppl. 22-3, p. 36-38.
- [3] Васильев В.В., Наумов К.П., Ушаков В.Н. Радиотехника, 1986, № 11, с. 36-39.

Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина)

Поступило в Редакцию
18 июля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 24

26 декабря 1988 г.

СВЕТОДИОДЫ С ИЗЛУЧЕНИЕМ В ЗЕЛЕННОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА НА БАЗЕ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ КАРБИДА КРЕМНИЯ ПОЛИТИПА 4Н

А.С. Бараш, Ю.А. Водаков,
Е.Н. Кольцова, А.А. Мальцев,
Е.Н. Мохов, А.Д. Роенков

Ранее уже сообщалось, что карбид кремния является перспективным материалом для создания высокостабильных инжекционных светоизлучающих диодов (СИД) [1], которые с успехом используются в современных системах записи и воспроизведения информации. Были

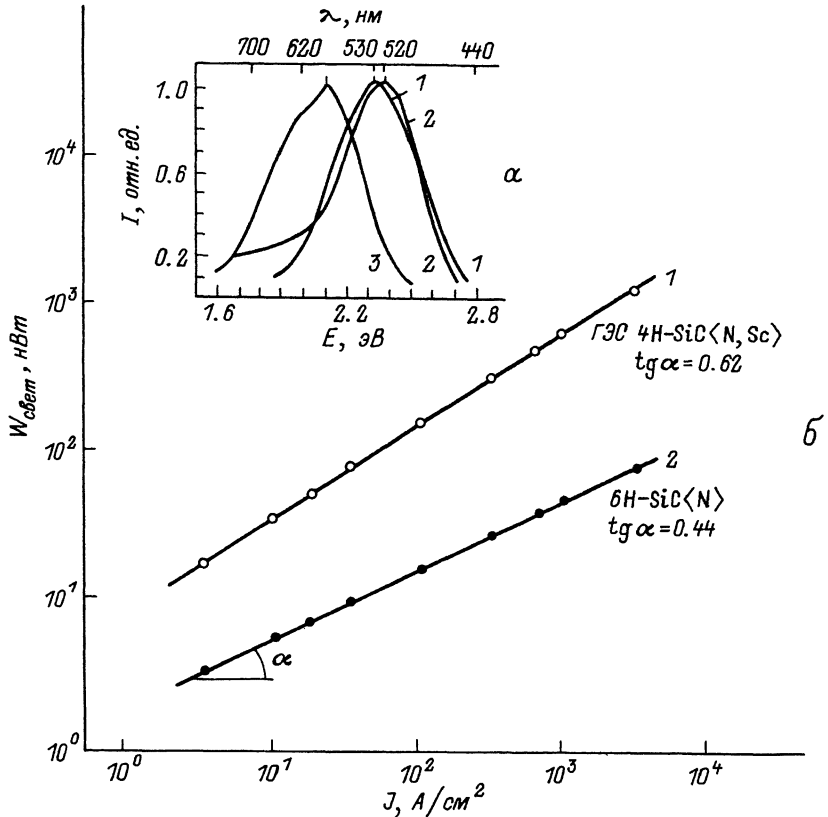


Рис. 1. а) Спектральные характеристики карбидкремниевых светодиодов, созданных диффузией бора: 1 - в гетероэпитаксиальный слой $4H-SiC \langle N \rangle$, 2 - в гетероэпитаксиальный слой $4H-SiC \langle N, Sc \rangle$, 3 - в монокристалл $6H-SiC \langle N \rangle$. б) Зависимость световой мощности от плотности тока для одного канала многоэлементной матрицы: 1 - на ГЭС $4H-SiC \langle N, Sc \rangle$, 2 - на монокристалле $6H-SiC \langle N \rangle$.

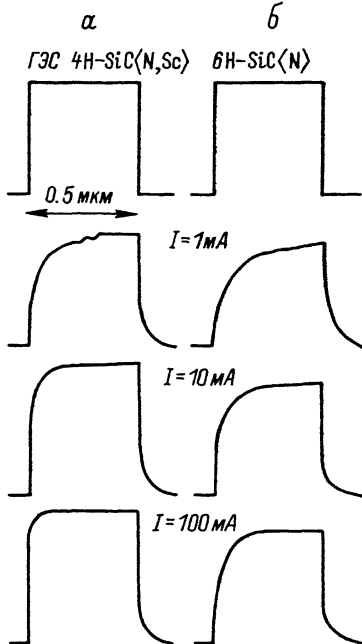
показаны возможности получения р-р-структур на карбиде кремния с излучением в красной, желтой, зеленой, сине-голубой и фиолетовой областях спектра [2-8]. Однако до последнего времени наиболее освоенным оставалось производство „борных“ СИД с желтой электролюминесценцией (ЭЛ) ($\lambda_{max} = 580$ нм), р-р-переход которых формировался диффузией бора в монокристаллические пластины или эпитаксиальные слои (ЭС) $6H-SiC$ [9]. В связи с быстрым развитием и широким распространением новых фотоматериалов, на-

пример фототермопластика, требуются СИД с более коротковолновым излучением. В частности, „зеленые“ СИД могут быть получены также диффузией бора в n - SiC политипа 4Н ($E_g = 3.1$ эВ), легированный азотом. Но, как известно, политип 4Н относится к редким политипам (степень распространенности $\sim 1\%$), поэтому в настоящей работе СИД создавались на базе гетероэпитаксиальных слоев (ГЭС) 4Н- SiC , выращенных на подложках наиболее распространенных политипов SiC : 6Н и 15R.

Рост ГЭС 4Н- SiC осуществлялся сублимационным „сэндвич“-методом (CCM) в присутствии примесей 1У группы (Ge, Sn, Pb), обеспечивающих достаточно полную (80–100%) трансформацию политипа подложки в политип 4Н [10]. При этом на подложках p -6Н или p -15R- SiC , выращенных методом Лели, формировался слой 4Н- SiC p -типа проводимости, легированный азотом, с концентрацией нескомпенсированных доноров $N_d - N_a = 5 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Для повышения эффективности излучательной рекомбинации рост слоя 4Н- SiC на заключительной стадии велся при дополнительном введении в зону роста паров кремния [11]. Активатор люминесценции — бор вводился путем диффузии при температуре 1920 °С [12]. Таким образом, были созданы одиночные СИД для визуального наблюдения, а также многоэлементные матрицы для записи и считывания информации. Спектральная характеристика таких СИД представлена на рис. 1,а. Как видно, максимум излучения приходится на длину волны 530 нм. Для получения более коротковолнового излучения использовалось дополнительное легирование ЭС 4Н- SiC p -типа проводимости скандием, который приводил к смещению максимума спектра ЭЛ до 520 нм. Вывод излучения осуществлялся через полированный торец кристалла, либо через p -подложку в направлении, перпендикулярном плоскости p - n -перехода. Свечение одиночных СИД наблюдалось уже при токах $7 \cdot 10^{-4} \text{ А/см}^2$ (площадь 10^{-2} см^2), что свидетельствует о малых токах утечки p - n -перехода, которые не превышали 6–8 мкА при $U_{обр} = 15$ В. На лучших образцах внешний квантовый выход составляет $4 \cdot 10^{-3}$, а КПД около 10^{-3} .

На рис. 1,б показана зависимость световой мощности от плотности тока одного канала многоэлементной матрицы на базе ГЭС 4Н- SiC . Таких каналов может быть от 10 до 64 с минимальной площадью контакта $3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$. Электрические и оптические характеристики каждого канала должны быть одинаковыми (разброс не должен превышать 5%), а это достигается за счет высокого структурного совершенства при 100% политипной однородности ГЭС 4Н- SiC на площади 0.5 – 1.5 см^2 , а также за счет однородного легирования азотом и скандием выращенных ЭС. Из рис. 1,б видно, что при токе $3.2 \cdot 10^3 \text{ А/см}^2$ световая мощность канала матрицы на 4Н- SiC составляет 1.1 мкВт, в то время как у матрицы на 6Н- SiC эта величина больше, чем на порядок уступает первой при той же плотности тока. Получаемая при этом яркость с одного канала на политипе 4Н в $1700 \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$ (при выводе света через торец)

Рис. 2. Формы световых импульсов многоэлементных матриц при возбуждении прямоугольным токовым импульсом длительностью 0,5 мкс: а) матрица на ГЭС 4Н-SiC, б) матрица на 6Н-SiC.



не является пределом возможного и может быть увеличена (по крайней мере в 1,5 раза).

На рис. 2 показаны типичные формы световых импульсов многоэлементных матриц при возбуждении их прямоугольным импульсом тока длительностью 0,5 мкс, амплитудой 1, 10 и 100 мА. Сравниваются диффузионные «борные» матрицы на ГЭС 4Н-SiC (N, Sc) с $\lambda_{max} = 520$ нм и на кристаллах 6Н-SiC (N), выращенных по методу Лели с $\lambda_{max} = 580$ нм. Начиная с токов 10 мА и выше, время срабатывания матрицы на 4Н-SiC в 2 раза меньше, чем на 6Н-SiC.

В заключение следует отметить, что на базе ГЭС 4Н-SiC могут быть получены высокостабильные, быстродействующие и эффективные СИД с излучением не только в зеленой, но и в голубой, синей и фиолетовой областях спектра.

Авторы выражают благодарность В.Ю. Абакумову, И.П. Егоровой за помощь в проведении измерений.

Л и т е р а т у р а

- [1] Таиров Ю.М., Водаков Ю.А. - Topics in Applied Physics, 1977, v. 17, p. 31-61.
- [2] Кальнин А.А., Таиров Ю.М., Яськов Д.А. - ФТТ, 1966, т. 8, № 3, с. 948-951.
- [3] Виолин Э.Е., Холуянов Г.Ф. - ФТТ, 1964, т. 6, № 6, с. 1696-1701.
- [4] Гусев В.М., Демаков К.Д., Косагонова М.Г., Рейфман М.Б., Столярова В.Г. - ФТП, 1975, т. 9, № 7, с. 1238-1242.
- [5] Hoffmann L., Ziegler G., Theis D., Weyrich C. - Journal of Applied Physics, 1982, v. 53, N 10, p. 6962-6967.

- [6] М о х о в Е.Н. и др. - В сб.: Тез. докл. Ш Всес. совеща-
ния по физике и технологии широкозонных полупроводников.
Махачкала, 1986, с. 67.
- [7] 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. - Пись-
ма в ЖТФ, 1985, т. 11, № 4, с. 246-248.
- [8] N i s h i n o S., I b a r a k i A., M a t-
s u n a m i H., T a n a k a T. - Jap. Journal
of Applied Physics, 1980, v. 19, N 7, L353-L356.
- [9] V o d a k o v Y.A., M o k h o v E.N. -
Silicon Carbide - 1973, Proceed III Int. Conf.
on SiC, South Carolina Univ. Press, 1974,
p. 509-521.
- [10] В о д а к о в Ю.А., Л о м а к и н а Г.А., М о х о в Е.Н.
ФТТ, 1982, т. 24, № 5, с. 1377-1383.
- [11] В е р е н ч и к о в а Р.Г., В о д а к о в Ю.А., М а л ь-
ц е в А.А., М о х о в Е.Н., О д и н г В.Г. - В сб.:
Тез. УП Всес. конференции по росту полупроводниковых крис-
таллов и пленок. Новосибирск, 1986, т. 1, с. 281.
- [12] В и о л и н Э.Е., Х о л у я н о в Г.Ф. - ФТТ, 1964,
т. 6, № 6, с. 1696-1701.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
30 августа 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 24

26 декабря 1988 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРАВНИТЕЛЬНОЙ СТЕПЕНИ
УПОРЯДОЧЕННОСТИ СОСТОЯНИЙ ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ
НА ОСНОВЕ S -ТЕОРЕМЫ
ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ
Ю.Л. К л и м о н т о в и ч

Критерий относительной степени упорядоченности состояний от-
крытых систем на основе сравнения значений энтропии Больцмана-
Гиббса-Шеннона при заданном значении средней эффективной энер-
гии - „функции Гамильтона“ (S -теорема) был введен в работах
[1, 2] на примерах развития генерации в системе Ван дер Поля
и перехода от ламинарного к стационарному турбулентному течению.
Обзор первых результатов дан в [3]. В [4] приведено общее до-
казательство S -теоремы.

Цель настоящей работы - демонстрация возможности использова-
ния критерия, основанного на S -теореме непосредственно по реал-
лизациям, найденным из эксперимента, для различных внутренних
параметров системы $X(t, a)$ и, следовательно, без использования
информации о структуре „функции Гамильтона“. Здесь $a = (a_1, \dots, a_n)$ -
набор управляющих параметров. Возможный выбор управляющих па-