

УДК 535.14.62 :375.828

К. ф.-м. н. А. С. ГАРКАВЕНКО

Германия, г. Штутгарт, Международный НПЦ энергосберегающих технологий  
E-mail: garks@arcor.de

## ПРИРОДА ПЕРЕХОДОВ И МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРАЦИИ В ЛАЗЕРАХ НА ОСНОВЕ РАДИАЦИОННО ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ CdS

*Исследование показало, что оптимальными рабочими переходами в лазерах с электронным возбуждением на основе радиационно легированных, оптически однородных кристаллов CdS являются переходы из вырожденной зоны проводимости на мелкие акцепторные уровни изотопов палладия и серебра.*

*Ключевые слова:* лазер, электронная накачка, радиационное легирование

Для создания мощных полупроводниковых лазеров на основе радиационно легированных кристаллов CdS необходимо исследовать механизмы генерации в них и выявить оптимальные высокоэффективные переходы, ответственные за получение больших мощностей. Для оптимизации свойств и улучшения выходных параметров лазеров с электронной накачкой с помощью радиационных технологий производилась модификация свойств нелегированных образцов CdS с целью создания оптически однородных кристаллов, слабо поглощающих и рассеивающих собственное излучение.

Исходные образцы подвергались облучению быстрыми нейтронами с энергией 14,5 МэВ и дозой  $6,3 \cdot 10^{18}$  нейтрон/см<sup>2</sup>. В результате ядерных реакций, протекающих при взаимодействии быстрых нейтронов с ядрами кристаллической решетки, происходит ядерное (трансмутационное) легирование кристалла стабильными изотопами палладия (<sup>108</sup>Pd) и серебра (<sup>109</sup>Ag), создающими в кристалле мелкие акцепторные уровни [1, 2]. Высокая проникающая способность быстрых нейтронов обеспечивает достаточно равномерное распределение легирующей примеси по объему кристалла, что способствует улучшению его оптической однородности. После проведения легирования кристаллы облучались ионами неона (ионная имплантация) с энергией 100 кэВ и дозой  $6 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>, создающими мелкие донорные уровни, и подвергались термическому отжигу [2]. После отжига значительная часть ионов, захватив электроны, превращалась в нейтральные атомы, уменьшая тем самым равновесную концентрацию свободных электронов, что в свою очередь уменьшало потери лазерного излучения из-за поглощения на свободных носителях заряда. Кроме того, диффундируя по кристаллу, атомы неона создавали равномерное распределение примеси, что также способ-

ствовало улучшению оптической однородности исследуемых образцов. Отобранные по методике, описанной в [3, 4], кристаллы CdS обладали высокой оптической однородностью, флуктуации показателя преломления в них составляли  $\Delta n = 10^{-4} - 10^{-2}$ .

Для оценки качества материала методом оптического фазового сдвига измерялось время жизни излучательной рекомбинации, которое составило  $(3,1 - 1,0) \cdot 10^{-9}$  с [3, 4]. Было установлено, что при 300 К минимальная пороговая плотность накачки ( $2 - 3$  А/см<sup>2</sup>) и максимальные КПД (до 11 - 15%) достигаются в кристаллах с концентрацией акцепторной примеси изотопа серебра  $N_a^{Ag} \approx 2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Мощность излучения в них достигала 200 - 250 Вт (рис. 1). При 80 К

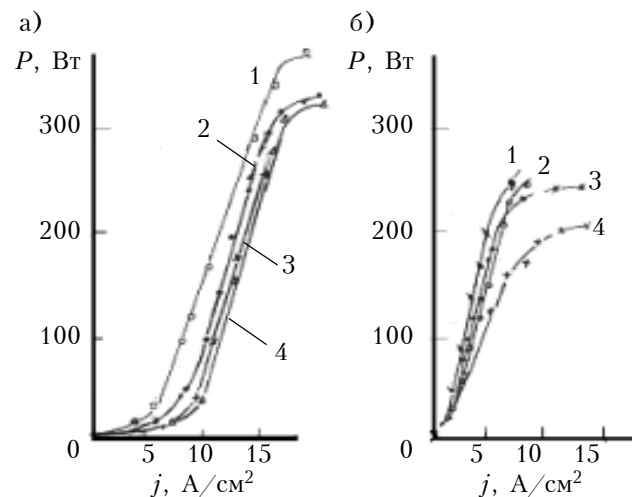


Рис. 1. Зависимость мощности  $P$  излучения лазеров на основе кристаллов CdS, радиационно легированных изотопами Ag (1, 2) и Pd (3, 4), от плотности накачки  $j$  при 80 К (а) и 300 К (б) для различной концентрации примеси ( $10^{17}$  см<sup>-3</sup>)  
1 -  $N_a^{Ag} = 2$ ; 2 -  $N_a^{Ag} = 1,5$ ; 3 -  $N_a^{Pd} = 1$ ; 4 -  $N_a^{Pd} = 0,85$

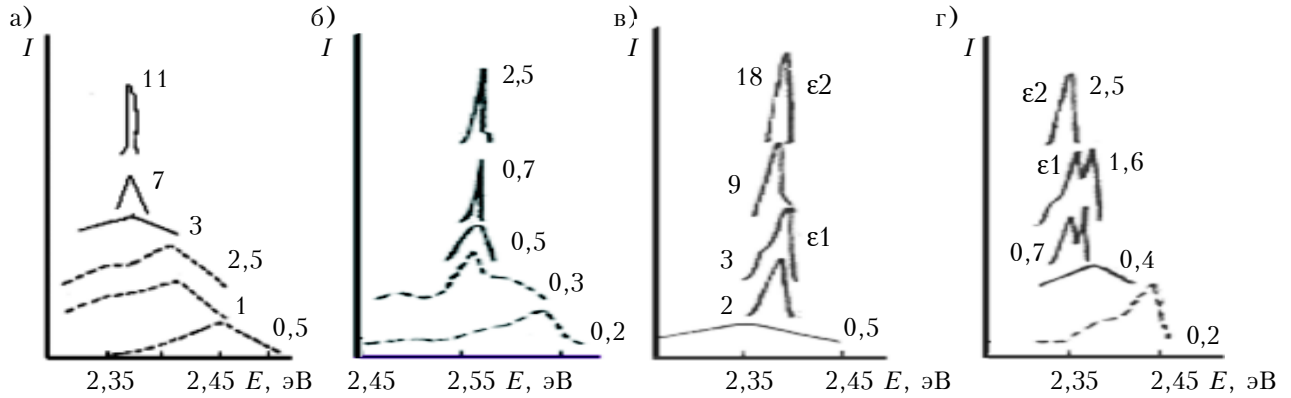


Рис. 2. Спектры катодолуминесценции (штриховые) и генерации (сплошные) кристаллов CdS, нелегированных (а, б) и радиационно легированных (в, г) изотопами Pd (ε1) и Ag (ε2), при 300 К (а, в) и 80 К (б, г) (Цифры возле кривых указывают плотность тока  $j$  в  $A/cm^2$ )

у таких кристаллов также были низкие пороговая плотность  $j_{пор}$  (0,5–1,0  $A/cm^2$ ) и высокие КПД (вблизи предельных значений 25–30%), мощность достигала 300–400 Вт. В то же время, в нелегированных образцах с концентрацией носителей  $10^{16} cm^{-3}$  при 300 К и  $j_{пор} = 25–30 A/cm^2$  генерация практически не была достигнута, а наблюдалось только сужение линии суперлюминесценции. При 80 К параметры излучения в этих кристаллах также были существенно хуже, чем в легированных –  $j_{пор} = 2,5–3,5 A/cm^2$ , КПД не выше 5%, а мощность излучения с ростом накачки быстро насыщалась. Было установлено, что такое отличие параметров излучения легированных и нелегированных оптически однородных кристаллов CdS обусловлено разными механизмами генерации в них.

Исследование зависимости спектров катодолуминесценции и генерации от уровня возбуждения при 80 и 300 К позволило выявить причины существенного отличия процесса генерации в чистых и легированных кристаллах CdS (рис. 2). Оказалось, что новые спектральные линии, обнаруженные в легированном CdS, возникают в результате излучательной рекомбинации свободных носителей через мелкие акцепторные уровни с глубиной залегания 81 мэВ (ε1) и 94 мэВ (ε2), создаваемые примесью изотопов, соответственно, палладия и серебра. Вероятность такой рекомбинации с ростом концентрации примесей растет. Измерения времени жизни носителей заряда в этих кристаллах подтвердили высокую вероятность  $W$  излучательной рекомбинации носителей в примесных образцах через ε-уровни:  $W=1/\tau \approx (0,3–1,0) \cdot 10^9 c^{-1}$  [2–4].

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента усиления  $G$  в максимуме полосы из-

лучения от концентрации неравновесных носителей при 80 и 300 К для перехода «зона проводимости – мелкий акцепторный уровень изотопа серебра» при концентрации примесей  $N_d^{Ne}=1 \cdot 10^{17} cm^{-3}$ ,  $N_a^{Ag}=2 \cdot 10^{17} cm^{-3}$  и энергии акцепторного уровня изотопа серебра  $E_a=94$  мэВ и для сравнения – для межзонных переходов. В таблице приведены расчетные значения коэффициентов межзонной ( $B_{33}$ ) и «зона – акцептор» ( $B_{3A}$ ) излучательной рекомбинации и расчетные значения пороговой плотности тока  $j_{пор}$  [5]. Согласно расчету, величина пороговой плотности тока в случае примесных переходов значительно меньше, чем в случае межзонных переходов, и при 300 К составила 2,3  $A/cm^2$ , а при 80 К – 0,42  $A/cm^2$ , что хорошо согласуется с полученными экспериментальными значениями.

Более существенное снижение внешней дифференциальной квантовой эффективности  $\eta_d$  в

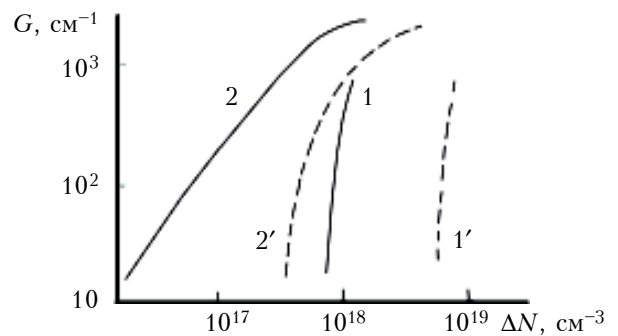


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления кристалла CdS от концентрации неравновесных носителей  $\Delta N$  для межзонных переходов (1, 1') и для переходов «зона проводимости – мелкий акцепторный уровень изотопа серебра» (2, 2') при 80 К (1, 2) и 300 К (1', 2')

T, К	$B_{33}, cm^{-3} \cdot c^{-1}$	$B_{3A}, cm^{-3} \cdot c^{-1}$	Переход межзонный		Переход «зона – примесь» ( $E_a = 94$ мэВ)	
			$\Delta N_{пор}, cm^{-3}$	$j_{пор}, A/cm^2$	$\Delta N_{пор}, cm^{-3}$	$j_{пор}, A/cm^2$
80	$9,2 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$8,6 \cdot 10^{17}$	14	$9 \cdot 10^{16}$	0,42
300	$8,1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{18}$	46	$4,2 \cdot 10^{17}$	2,3

нелегированных кристаллах CdS обусловлено тем, что значения пороговых концентраций неравновесных носителей  $\Delta N_{\text{пор}} (\Delta P_{\text{пор}})$ , а соответственно и коэффициентов поглощения на свободных носителях  $\alpha_{\text{СН}}^{e,h}$ , в таком материале больше, а величина внутреннего квантового выхода излучения  $\beta$  — меньше [6, 7]. В легированных полупроводниках пороговая концентрация неравновесных носителей для излучательного перехода «зона проводимости — мелкий акцептор» существенно меньше, чем в нелегированных, с межзонным механизмом излучательных переходов. При этом потери на поглощение свободными носителями, принципиально ограничивающие КПД, на порядок меньше [8].

Спектральные и энергетические характеристики лазеров с электронным возбуждением на основе нелегированных оптически однородных полупроводников CdS показали, что излучение в них возникает в результате рекомбинации носителей, которые образуют электронно-дырочную плазму большой плотности. Мощность таких лазеров может достигать высоких значений, однако существенно меньших, чем у лазеров на основе оптически однородных, радиационно легированных кристаллов.

#### Выводы

Исследование механизмов генерации в чистых и радиационно легированных оптически однородных ( $\Delta n = 10^{-4} - 10^{-3}$ ) кристаллах CdS показало, что в лазерах с электронным возбуждением на основе таких кристаллов оптимальными рабочими переходами, позволяющими достигать максимальной мощности излучения, являются переходы из вырожденной зоны проводимости на мелкие акцепторные уровни, обусловленные наличием примеси изотопов палладия и серебра. Оптимальные значения концентрации легирующих примесей определяются особенностями зонной структуры и физико-химическими свойствами исходного кристалла. Следует отметить, что в очень чистых, с концентрацией примеси  $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , и оптически однородных ( $\Delta n = 10^{-6} - 10^{-5}$ ) кристаллах CdS при температуре 80 К может возникать экситонный механизм генерации.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Мокрицкий В. А., Гаркавенко А. С., Зубарев В. В., Ленков С. В. Радиационное легирование сульфида кадмия и арсенида галлия // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2003. — № 6. — С. 14–17. [Mokritskii V. A., Garkavenko A. S., Zubarev V. V., Lenkov S. V. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature. 2003. N 6. P. 14]
2. Ленков С. В., Мокрицкий В. А., Гаркавенко А. С. и др. Радиационное управление свойствами материалов и изделий опто- и микро-электроники. — Одесса: Друк, 2003. [Lenkov S. V., Mokritskii V. A., Garkavenko A. S. i dr. Radiatsionnoye upravleniye svoystvami materialov i izdelii opto- i mikro-elektroniki. Odessa. Druk. 2003.]

3. Гаркавенко А. С., Зубарев В. В., Ленков С. В. и др. Новые лазерные методы, средства и технологии. — Одесса: Астропринт, 2002. [Garkavenko A. S., Zubarev V. V., Lenkov S. V. i dr. Novyye lazernyye metody, sredstva i tekhnologii. Odessa. Astroprint. 2002.]

4. Видолоб В. В., Гаркавенко А. С., Ленков С. В., Мокрицкий В. А. Лазеры в метрологии полупроводников. — Одесса: Атлант, 2006. [Vidolob V. V., Garkavenko A. S., Lenkov S. V., Mokritskii V. A. Lazery v metrologii poluprovodnikov. Odessa. Atlant. 2006.]

5. Гаркавенко А. С., Ленков С. В., Мокрицкий В. А., Видолоб В. В. Полупроводниковые лазеры с электронной накачкой. Том 1. Механизм генерации, свойства излучения. — Одесса: Полиграф, 2006. [Garkavenko A. S., Lenkov S. V., Mokritskii V. A., Vidolob V. V. Poluprovodnikovyye lazery s elektronnoy nakachkoj. Tom 1. Mekhanizm generatsii, svoystva izlucheniya. Odessa. Poligraf. 2006.]

6. Гаркавенко А. С., Мокрицкий В. А. Расчет коэффициента поглощения ИК излучения свободными носителями заряда в полупроводниках // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1995. — № 1. — С. 36–37. [Garkavenko A. S., Mokritskii V. A. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature. 1995. N 1. P. 36]

7. Гаркавенко А. С., Гатало М. С., Кособуцкий П. С. Измерение квантового выхода фото- и электролюминесценции // Физическая электроника, 1992. — Вып. 42. — С. 116–118. [Garkavenko A. S., Gatalo M. S., Kosobutskii P. S. // Fizicheskaya elektronika, 1992. Iss. 42. P. 116]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 15.04 2011 г.

Garkavenko A. S. **The nature of transitions and generation mechanisms in lasers based on radiation-doped CdS crystals.**

*Keywords: laser, electron pumping, radiation-doping.*

The research has shown that the optimum laser transitions in electronic excitation lasers based on radiation doped, optically homogeneous CdS crystals are the transitions from the degenerate conduction band to shallow acceptor levels of palladium and silver isotopes.

Germany, Stuttgart, International Energy-saving Technologies Research Center.

Гаркавенко А. С. **Природа переходів та механізмів генерації в лазерах на основі радіаційно легованих кристалів CdS.**

*Ключові слова: лазер, електронна накачка, радіаційне легування.*

Дослідження показало, що оптимальними робочими переходами в лазерах з електронним збудженням на основі радіаційно легованих, оптично однорідних кристалів CdS є переходи з виродженої зони провідності на дрібні акцепторні рівні ізоотопів палладію та срібла.

Німеччина, Штутгарт, Міжнародний НПЦ енергозаощаджуючих ресурсів.