

СОЗДАНИЕ ИНВЕРСНОЙ НАСЕЛЕННОСТИ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ
ПУТЕМ УДАРНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИМЕСИ

Н. А. Власенко, Ж. А. Пухлий

Известны два метода создания инверсной населенности в полупроводниках непосредственно электрическим возбуждением. Первый метод основан на инжекции неравновесных носителей тока через $p-n$ -переход в вырожденных полупроводниках [1]; он реализован в инжекционных лазерах. Второй метод заключается в создании инверсной населенности в зоне проводимости (или валентной зоне) однородного полупроводника импульсами электрического поля, вызывающими ионизацию ионов основной решетки или примеси [2 – 6]. До настоящего времени нет однозначного доказательства того, что этим методом удалось создать инверсную населенность.

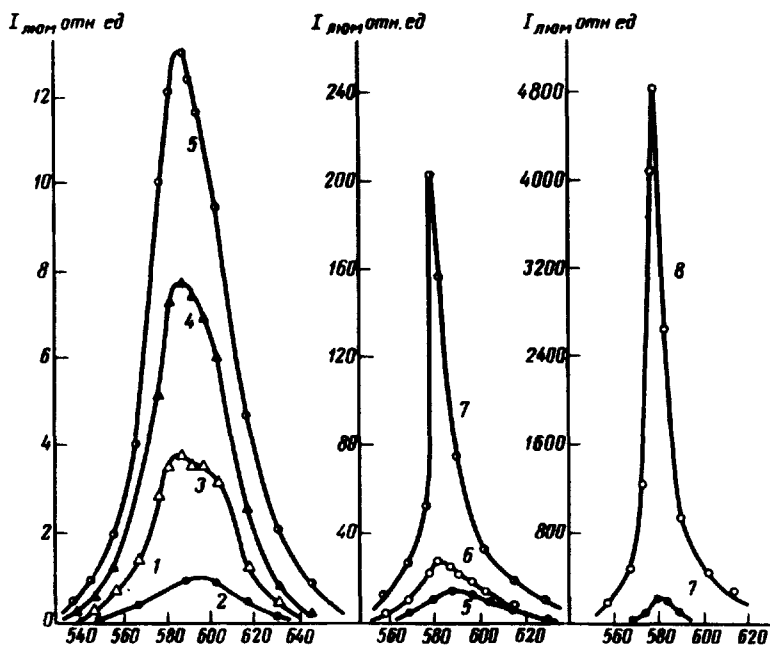


Рис. 1. Спектры излучения $ZnS \cdot Mn$ при различной напряженности возбуждающего электрического поля: 1 – $0,8 \cdot 10^6$, 2 – $1 \cdot 10^6$, 3 – $1,1 \cdot 10^6$, 4 – $1,2 \cdot 10^6$, 5 – $1,3 \cdot 10^6$, 6 – $1,46 \cdot 10^6$, 7 – $1,62 \cdot 10^6$ в/см

В данной работе предлагается новый метод создания инверсной населенности в твердых телах на возбужденных уровнях глубоких примесных центров путем ударного возбуждения их основными носителями,

ускоренными внешним электрическим полем. Подобный метод с успехом используется в газовых лазерах.

Предлагаемый метод создания инверсной населенности осуществлен нами в сернистом цинке, легированном марганцем. Это вещество представляет собой широкозонный ($\epsilon_g = 3,7 \text{ эВ}$) высокоомный полупроводник n -типа ($\rho \sim 10^8 - 10^{10} \text{ ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$). Марганец входит в решетку ZnS в виде Mn^{2+} , замещая цинк. Наличие незаполненной $3d$ оболочки в Mn^{2+} приводит к появлению ряда локальных энергетических уровней, связанных с электронными переходами в этой оболочке. Основному состоянию (6S) иона Mn^{2+} соответствует электронная конфигурация $3d^5$ с параллельными спинами, возбужденному состоянию (4G) — переворачивание спина одного из $3d^5$ электронов. Кристаллическое поле решетки приводит к расщеплению возбужденного уровня на несколько подуровней и к частичному снятию запрета с рассматриваемых переходов. Люминесценция в $\text{ZnS} \cdot \text{Mn}$ обусловлена переходом из нижайшего возбужденного уровня ${}^4T_1 ({}^4G)$ на основной ${}^6A_1 ({}^6S)$ и имеет спектр в виде широкой полосы (полуширина $\sim 700 \text{ \AA}$) с $\lambda_{\text{макс}} = 590 \text{ нм}$ [7]. Механизм возбуждения электролюминесценции в $\text{ZnS} \cdot \text{Mn}$ — ударное возбуждение примесных ионов [8, 9].

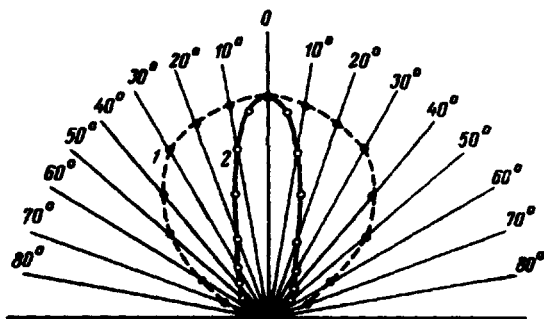


Рис. 2. Диаграмма направленности излучения с $\lambda = 580 \text{ нм}$ при напряженности поля ниже (кривая 1, $E = 1,2 \cdot 10^6 \text{ в/см}$) и выше пороговой (кривая 2, $E = 1,5 \cdot 10^6 \text{ в/см}$)

На рис. 1 приведены спектры излучения $\text{ZnS} \cdot \text{Mn}$, полученные нами при различной напряженности E электрического поля. Начиная с некоторого "порогового" значения $E_{\text{пор}} (\sim 1,4 \cdot 10^6 \text{ в/см})$ полоса излучения начинает сильно сужаться, что сопровождается резким ростом интенсивности (на 2 — 3 порядка величины). При этом изменяется также и пространственное распределение излучения — появляется явно выраженная направленность излучения (см. рис. 2). При $E > E_{\text{пор}}$ излучение становится частично когерентным, о чем свидетельствует наличие интерференционной картины с видимостью 0,2 при дифракции на двух щелях, помещенных за выходным зеркалом (ширина щелей — 20 мкм , расстояние между ними — 30 мкм). Плотность тока через образец при пороговой напряженности поля была $\sim 10^{-2} \text{ а/см}^2$. Внутренний квантовый выход в режиме генерации (отношение числа испущенных в 1 с фотонов к числу электронов, прошедших через образец за это время) намного превышает единицу. Коэффициент усиления, измеренный путем сравнения интенсивности света, прошедшего через воз-

бужденный и невозбужденный образец, равен $(1 - 5) \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ для $\lambda = \lambda_{\text{макс}}$.

Перечисленные выше факты свидетельствуют о том, что при приложении к $\text{ZnS} \cdot \text{Mn}$ поля с напряженностью, бóльшей $1,4 \cdot 10^6 \text{ в/см}$, на возбужденных уровнях ионов Mn^{2+} возникает инверсная населенность, приводящая к появлению стимулированного излучения. Механизм создания инверсной населенности — ударное возбуждение иона Mn^{2+} . Об этом свидетельствуют такие факты: спектр излучения, типичный для перехода ${}^4T_1({}^4G) \rightarrow {}^6A_1({}^6S)$ в ионе Mn^{2+} , малая плотность порогового тока, отсутствие заметного разогрева образца, величина внутреннего квантового выхода генерации ($\gg 1$).

Предложенный метод создания инверсной населенности имеет ряд положительных качеств: 1) допускает возбуждение в непрерывном режиме без специального охлаждения образца, 2) обеспечивает высокий КПД преобразования электрической энергии в световую, 3) позволяет создавать большую перенаселенность и получать высокие коэффициенты усиления.

В заключение выражаем благодарность за дискуссию и ценные советы академику АН УССР С.И.Пекару, профессору М.П.Лисице, профессору М.В.Фоку и доктору физ-мат. наук М.С.Соскину.

Поступила в редакцию
23 августа 1971 г.

Институт полупроводников
Академии наук Украинской ССР

После переработки
14 сентября 1971 г.

Литература

- [1] Н.Г.Басов, О.Н.Крохин, Ю.М.Попов, ЖЭТФ, **40**, 1879, 1961.
- [2] Н.Г.Басов, Б.М.Вул, Ю.М.Попов, ЖЭТФ, **37**, 587, 1959.
- [3] Н.Г.Басов, О.Н.Крохин, Ю.М.Попов, УФН, **72**, 161, 1960.
- [4] О.Н.Крохин, Ю.М.Попов, ЖЭТФ, **38**, 1589, 1960.
- [5] Н.Г.Басов, Б.Д.Осипов, А.Н.Хвощев, ЖЭТФ, **40**, 1880, 1961.
- [6] Б.Д.Осипов, А.Н.Хвощев, ЖЭТФ, **43**, 1179, 1962.
- [7] Физика и химия соединений $A^{II}B^{VI}$, Изд. Мир, М., 1970, стр. 363.
- [8] Н.А.Власенко, А.М.Яремко. Оптика и спектроскопия, **18**, 467, 1965.
- [9] Н.А.Власенко, А.Н.Гергель. Phys. stat., sol., **26**, 77, 1968.